Spektrum DER WISSENSCHAFT

ERDE 3.0

Sichere Energieversorgung – nur durch Windkraft!

JANUAR 2012

1/12 Spektrum DER WISSENSCHAFT

DINOSAURIER
Spektakulärer Fossilfund in der Wüste Gobi

PHYSIK
Die Quanteneigenschaften großer Moleküle

SCHWARMVERHALTEN
Mathematiker modellieren den Vogelflug

Sind Wissenschaft und Religion vereinbar?

7,90 € (D/A) · 8,50 € (L) · 14,– sFr.
D6179E

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

www.spektrum.de

Carsten Könneker
Chefredakteur
koenneker@spektrum.com

Grenzen ziehen – oder überschreiten?

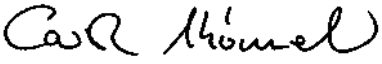
Dass er seinen Platz ausgerechnet unter dem einzigen Kruzifix im ganzen Restaurant gewählt hatte, irritierte Harold Kroto nur kurz. Ich hatte den Chemie-Nobelpreisträger des Jahres 1996 im vergangenen Juni zu einem Gespräch im bayerischen Lindau getroffen. Wir diskutierten über den Forschungsstandort Deutschland, die zunehmende Medialisierung der Kindheit und – natürlich – über Religion. Denn nichts zu glauben, ja jede Art von Glauben mit Argumenten zu bekämpfen, das ist Krotos große Mission. Wie der Evolutionsbiologe Richard Dawkins reist der Entdecker der Fullerene durch die Lande und prangert irrationales Denken an. Gerade Religion sei nichts als »ein Geschäft mit der Dummheit der Leute«, erboste er sich im Interview mit Spektrum.de (siehe www.spektrum.de/kroto).

Ganz anders ein anderer Nobelpreisträger: Max Planck hielt 1937 einen viel beachteten Vortrag über »Religion und Naturwissenschaft«. Darin distanzierte sich der Begründer der Quantentheorie ausdrücklich von einer »Gottlosenbewegung«, die »für den frommen Glauben an eine höhere Macht über uns nur Worte des Hohns« übrighabe und dabei den naturwissenschaftlichen Erkenntnisfortschritt vor den eigenen Karren spanne. Das Bündnis zwischen Religionskritik und Wissenschaft sei jedoch in Wirklichkeit nur ein scheinbares und blende die Menschen.

Auch wenn man Plancks Ausführungen vor dem Hintergrund seiner Epoche betrachten muss: Anders als Kroto stand er dem Glauben an eine ordnungsstiftende übernatürliche Kraft versöhnlich gegenüber – und argumentierte ebenfalls mit der Vernunft. So habe gerade die Wissenschaft erkannt, dass sämtliche Naturprozesse zweckgerichtet ablaufen, nämlich so, dass sie die so genannte Wirkung minimieren. Dieses als hamiltonsches Prinzip bekannte Gesetz habe auch den Übergang von der klassischen zur modernen Physik überdauert und sei universell gültig, Zeichen einer Zweckbestimmung der Welt jenseits des menschlichen Sinnes- und Erkenntnisapparats. Und so kam Planck, ohne einem bestimmten Glauben das Wort zu reden, zu dem Schluss: »Religion und Naturwissenschaft – sie schließen sich nicht aus …, sondern sie ergänzen und bedingen einander.«

Neigen Sie eher Kroto oder Planck zu? Wie gestaltet sich das Verhältnis von Vernunft und Glaube? Erachten Sie die Theologie als eine Wissenschaft, oder hat die Disziplin an den Universitäten des 21. Jahrhunderts nichts mehr verloren? Wir baten den Mathematiker und Religionsphilosophen Christian Tapp von der Ruhr-Universität Bochum um eine Erörterung dieser Fragen (S. 56). Im Anschluss daran lesen Sie ein Streitgespräch zwischen dem Gießener Soziobiologen Eckart Voland und dem Innsbrucker Religionsphilosophen Winfried Löffler (S. 64). Außerdem laden wir Sie ein, auf unseren neuen Onlineseiten selbst in die Diskussion einzusteigen: www.spektrum.de/vernunft

Herzlich Ihr



AUTOREN IN DIESEM HEFT

Der Paläontologe **Paul C. Sereno** von der University of Chicago hat bereits mehr als zwei Dutzend neue Dinosaurierarten entdeckt. Doch selten überraschte ihn ein Fossilfund so sehr wie das »Schlammgrab« etlicher Jungsaurier in der Wüste Gobi (S. 28).

Die Physiker **Markus Arndt**, **Jörg Schmiedmayer** und **Markus Oberthaler** haben in ausgeklügelten Experimenten einige verblüffende Konsequenzen der Quantenmechanik bestätigt (S. 40).

Ist Theologie eine Wissenschaft? **Christian Tapp**, Lehrstuhlinhaber für Philosophisch-Theologische Grenzfragen an der Ruhr-Universität Bochum, bezieht zu dieser Frage ab S. 56 Stellung.

BIOLOGIE & MEDIZIN

▸ **28 Tödliche Falle für Saurier**
Paul C. Sereno
Eine Herde jugendlicher Urzeitechsen fand im Schlamm eines Sees in der heutigen chinesischen Gobi den Tod

INTERVIEW
36 Die vergessenen Seuchen
Bernard Pécoul von der »Drugs for Neglected Diseases initiative« schildert die Herausforderung, Wirkstoffe gegen häufige, aber bisher vernachlässigte Krankheiten wie Leishmaniose oder Chagas-Krankheit zu entwickeln

PHYSIK & ASTRONOMIE

▸ **40 Hamlet in der Quantenwelt**
Markus Arndt et al.
Im skurrilen Reich der Quanten kann – anders als in Hamlets Monolog – etwas zugleich sein und nicht sein

46 Abschied vom Tevatron
Tim Folger
Mit der Abschaltung des berühmten amerikanischen Teilchenbeschleunigers ging jüngst eine Ära zu Ende. Könnte sich das Higgs-Teilchen in noch unausgewerteten Daten verbergen?

SCHLICHTING!
52 Temperierende Atemluft
H. Joachim Schlichting
Durch Darüberblasen lassen sich Dinge sowohl erwärmen als auch abkühlen. Wie das?

MENSCH & KULTUR

TITELTHEMA
▸ **56 Vernunft und Glaube**
Christian Tapp
Theologie will wissenschaftlich sein. Aber lassen sich ihre inneren Widersprüche beseitigen? Und wie besteht sie den Konflikt mit anderen Disziplinen?

STREITGESPRÄCH
64 Können Wissenschaft und Religion voneinander lernen?
Der Soziobiologe Eckart Voland und der Religionsphilosoph Winfried Löffler diskutieren den ewigen Konflikt

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN
72 David Hilbert
Marc Dressler
Vor 150 Jahren geboren, hat er die Mathematik des 20. Jahrhunderts geprägt wie kein anderer

56
TITELTHEMA
Wissenschaft und Religion

ERDE & UMWELT

ERDE 3.0

SERIE: DIE ZUKUNFT DER ENERGIE

▸ **78 Frische Brise**
Gerhard Samulat
Studien zufolge hat die Windenergie genug Potenzial, um den weltweiten Strombedarf zu decken. Bis es so weit ist, sind aber noch einige Herausforderungen zu bewältigen

INTERVIEW
86 Windstrom aus Nordafrika
Der Energieexperte Gregor Czisch setzt sich für ein interkontinentales Stromverbundnetz ein

TECHNIK & COMPUTER

▸ **90 Rätselhafte Koordination in Vogelschwärmen**
Brian Hayes
In Schwärmen bewegen sich Vögel exakt aufeinander abgestimmt, als würden sie ferngesteuert oder auf geheimnisvolle Weise dirigiert. Wie kommt es zu diesem hochgradig koordinierten Verhalten unabhängiger Individuen?

Titelmotiv: Spektrum der Wissenschaft / Claus Schäfer

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▸ gekennzeichnet

Nach S. 96 folgt eine 32-seitige Sonderpublikation des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung – UFZ: In Sachen Wasser

SPEKTROGRAMM

12 Silbertrichter erzeugt UV-Pulse • Wind diktiert Baumwachstum • *Homo sapiens* kam früher nach Europa • Riesige Eisvorkommen in entstehendem Planetensystem • Licht aus Vakuum • Blutplättchen entscheiden über Immunreaktion

BILD DES MONATS

15 Poröses Material aus Nickel

FORSCHUNG AKTUELL

16 Verwandlung im Untergrund
Direkter Nachweis von Neutrinooszillationen rückt näher

19 Bakteriengemeinschaften im Darm
Weltweit gibt es drei Typen von Darmbakterienpopulationen

22 Der kleinste Elektromotor
Ein Molekül lässt sich mit Strom in asymmetrische Drehung versetzen

24 Autismus: Neue genetische Fährten
Bei vielen Betroffenen liegen Gene in ungewöhnlicher Kopienzahl vor

26 Springers Einwürfe
Wir arrangieren uns mit dem Klimawandel

WEITERE RUBRIKEN

3 Editorial

7 In eigener Sache: Das neue Internetportal **Spektrum.de**

10 Leserbriefe/Impressum

97 Rezensionen
John Gould: Die Familie der Tukane
Dieter Lüst: Quantenfische
Gerhard Roth: Bildung braucht Persönlichkeit u. a.

104 Wissenschaft im Rückblick
Vom Fischschlaf zum Jupiterring

105 Exponat des Monats
Eine der ältesten Kameras der Welt

106 Vorschau

Unsere Neuerscheinungen

Gehirn&Geist 1-2/2012

SEI (K)EIN EGOIST!

Zehn Jahre und kein bisschen müde – G&G feiert Geburtstag!
Eine Dekade voller spannender Einblicke in die Welt der Psychologie und Hirnforschung liegt hinter uns. Viele wichtige Erkenntnisse haben wir im Booklet »50 Fragen – 50 Antworten« für Sie versammelt. Kompaktes Wissen rund um Psyche und Gehirn. Weitere Extras in der Jubiläumsausgabe 1-2/2012: Ein Preisrätsel mit zahlreichen attraktiven Gewinnen sowie der Auftakt unserer neuen zehnteiligen Serie »Die großen Gehirn&Geist-Themen«. Beiträge der aktuellen Ausgabe sind:
> Titelthema: Egoismus
> Psychologie: Momente des Glücks
> Psychiatrie: Zwangsmaßnahmen als letztes Mittel?
> Hirnforschung: Routine am Glimmstängel
und vieles mehr ...
***Gehirn&Geist** kostet € 7,90 als Einzelheft und ist auch im Abonnement (10 Ausgaben pro Jahr) für € 68,– inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis für € 55,–) zu beziehen.*

Gehirn&Geist-Spezial 1/2011

ENTDECKUNGSREISE DURCH DAS GEHIRN

Bis zu 100 Milliarden Neuronen, zigtausende Kilometer Nervenleitungen und Myriaden von Synapsen formen ein Netzwerk, das uns zu dem macht, was wir sind – denkende und fühlende Wesen. Das **G&G-Spezial** gewährt faszinierende Einblicke in die Maschinerie des Geistes. Aufwändig gestaltete Grafiken und prägnante Texte erläutern anschaulich, wie das Gehirn aufgebaut ist und wie es funktioniert – vom einzelnen Neuron bis hin zur Architektur der Großhirnrinde. Eine spannende Expedition durch die Welt der grauen Zellen! Aus dem Inhalt:
> Grundlagen: Meilensteine der Neurowissenschaft
> Anatomie: Hirnstrukturen
> Sinne: Der visuelle Kortex
> Motorik: Eine Bewegung planen
und vieles mehr ...
***Das Gehirn&Geist-Spezial** kostet € 8,90.*

Gehirn&Geist-Basiswissen 2/2011

NEURONE & CO. – BAUSTEINE DES GEHIRNS

Das Gehirn ist zweifellos das faszinierendste Organ, das unser Körper zu bieten hat. Es beherbergt ein gigantisches Netzwerk von Nervenzellen, die uns zu dem machen, was wir sind: denkende und fühlende Wesen. Nur das äußerst präzise Zusammenspiel seiner Bausteine erlaubt ihm, eine so komplexe Psyche wie die des Menschen zu formen. Doch wie kommunizieren Nervenzellen miteinander? Was lässt neue Synapsen sprießen? Und wie kann man neuronalen Netzwerken bei der Arbeit zusehen? Diese Fragen beantworten wir im vierten Teil unserer Heftserie »Basiswissen«. Aus dem Inhalt:
> Synapsen: Wie Nervenzellen kommunizieren
> Lernen: So entstehen neuronale Verknüpfungen
> Mikroglia: Schutzpatron des Gehirns
> Neue Methoden: Neurone in 3-D rekonstruieren
und vieles mehr ...
***Das Gehirn&Geist-Basiswissen** kostet € 8,90.*

Alle Hefte sind im Handel erhältlich oder unter:

Spektrum DER WISSENSCHAFT
WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

online: spektrum.com/lesershop
E-Mail: service@spektrum.com
Tel.: +49 6221 9126-743

Fax: +49 6221 9126-751
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg

IN EIGENER SACHE

Spektrum.de – der neue Internetauftritt von »Spektrum der Wissenschaft«

Stammzellen, Klimawandel, Hirnforschung – unser Wissen mehrt sich beständig und wird immer komplexer. Täglich werden auf allen Kontinenten Forschungsergebnisse erzielt und hunderte Studien publiziert. Die Redakteure von Spektrum.de prüfen die wichtigsten Quellen in ihren morgendlichen Konferenzen und stellen die relevanten Ergebnisse von Montag bis Freitag in Wort und Bild vor: allgemein verständlich und mit allen notwendigen Hintergrundinformationen versehen. Um dieses hochkarätige tagesaktuelle Informationspaket noch attraktiver zu machen, vereinigen wir unser früheres Onlineportal spektrumdirekt.de mit den Webseiten der Zeitschrift »Spektrum der Wissenschaft« jetzt zu Spektrum.de, dem Wissenschaftsnachrichtenportal von »Spektrum der Wissenschaft« im Internet – die perfekte Ergänzung zu Ihrem monatlich erscheinenden Magazin.

Auf Spektrum.de finden Sie ab sofort täglich aktuelle Hintergrundartikel, Nachrichten und Bilder aus der Wissenschaft. Dabei weiten wir das bisherige Angebot von spektrumdirekt.de deutlich aus. So kommentieren Experten aus der Praxis sowie renommierte Wissenschaftsjournalisten Ergebnisse aus der Forschung, die gesellschaftliche Relevanz besitzen, und ordnen sie ein. Ebenfalls neu ist die »Webwatch«: Hier geben wir Redakteure Ihnen spannende Hinweise auf Webseiten, die uns bei unseren Recherchen aufgefallen sind. In kurzen Kommentaren verraten wir Ihnen, was es auf den empfohlenen Seiten zu entdecken gibt.

Die Spektrum.de-Seiten werden zudem noch interaktiver: Sie können nun Artikel leichter kommentieren, sie auf sozialen Netzwerken wie Facebook mit Ihren Kontakten teilen oder per Twitter streuen. Und natürlich können Sie Spektrum.de auch bequem unterwegs auf dem iPad, Smartphone und anderen mobilen Endgeräten lesen. Dabei versuchen wir maximale Barrierefreiheit zu gewährleisten.

Jeden Freitagabend fassen wir außerdem die wichtigsten Themen der vorangegangenen Tage in unserer Wochenpublikation »Spektrum.de – Die Woche« zusammen. So erhalten Spektrum.de-Premiumabonnenten alles Wissenswerte auf einen Blick. »Die Woche« ist sowohl als PDF auf Spektrum.de abrufbar als auch auf Wunsch per E-Mail zu beziehen.

Die Redaktion von Spektrum.de besteht wie die der Zeitschrift »Spektrum der Wissenschaft« aus erfahrenen Redakteuren, die selbst ein naturwissenschaftliches Studium absolviert haben. Die beiden Redaktionen sind organisatorisch voneinander unabhängig, befruchten sich jedoch in ihrer täglichen Arbeit gegenseitig, indem sie sich rege über neue Studien und Trends in der Forschung austauschen.

Auf der folgenden Doppelseite stellen wir Ihnen die neue Startseite von Spektrum.de näher vor. Wir sind davon überzeugt, nach mehr als einem Jahr Entwicklungszeit eines der besten Wissenschaftsportale im deutschsprachigen Internet geschaffen zu haben. Testen Sie, ob wir diesem Anspruch gerecht werden – und geben Sie uns Feedback!

Herzlich

Carsten Könneker
Chefredakteur

Daniel Lingenhöhl
Redaktionsleiter Spektrum.de

Die neue Website von »Spektrum der Wissenschaft«:

Spektrum.de

Hauptnavigation:
Spektrum.de präsentiert täglich neue aktuelle Artikel, Bilder und Videos aus der Wissenschaft. Über die Hauptnavigation können Sie zu unserem PDF-gestützten Wochenmagazin »Die Woche« oder zum Monatsheft »Spektrum der Wissenschaft« wechseln. Die Menüleiste umfasst außerdem die Punkte Abonnement, Shops sowie Info & Service.

Subnavigation:
Das neue Angebot von Spektrum.de umfasst verschiedene Rubriken wie Topthemen, Meinung und Spektrogramme sowie das Archiv der Onlineseiten, die Sie hier direkt ansteuern können. Die Subnavigation zum Heft führt Sie zum Archiv des Monatshefts und der Sonderhefte. Außerdem erhalten Sie weiterführende Informationen über die Redakteure, die hinter den verschiedenen »Spektrum«-Publikationen stehen.

Topthemen:
Sorgfältig recherchierte und von verschiedenen Seiten beleuchtete Themen aus der Wissenschaft, die auch morgen noch relevant sind: Von Montag bis Freitag finden Sie hier täglich einen neuen umfassenden Hintergrundbeitrag über ein aktuelles Forschungsfeld – darunter auch Interviews und Videos.

Themenseiten:
Welche Fortschritte macht die Hirnforschung? Wie geht es auf dem Mars zu? Wie produzieren wir in Zukunft Energie? Im Lauf der Zeit berichten wir immer wieder zu bestimmten Schwerpunkten. Die wichtigsten Artikel dazu finden Sie auf den jeweiligen Themenseiten.

Navigation nach Fachgebieten:
Ob Archäologie, Biologie oder Physik – ab sofort können Sie auch entlang Ihrer persönlichen Interessengebiete durch die »Spektrum«-Seiten navigieren und sich gezielt nur die Artikel aus den für Sie spannendsten Disziplinen anzeigen lassen.

Unsere aktuellen Titel:
Der kurze Weg zur neuesten Ausgabe von »Spektrum der Wissenschaft«, zu unseren Sonderheften sowie zu »Spektrum.de – Die Woche«

Meinung:
Ob Stammzellforschung oder Klimapolitik: Manche Ergebnisse oder Vorhaben der Wissenschaft werden kontrovers diskutiert und verlangen nach qualifizierter Einordnung. Die Spektrum.de-Redaktion lädt regelmäßig anerkannte Experten sowie Fachjournalisten ein, um Ihnen bei Ihrer eigenen Meinungsbildung Orientierung zu geben.

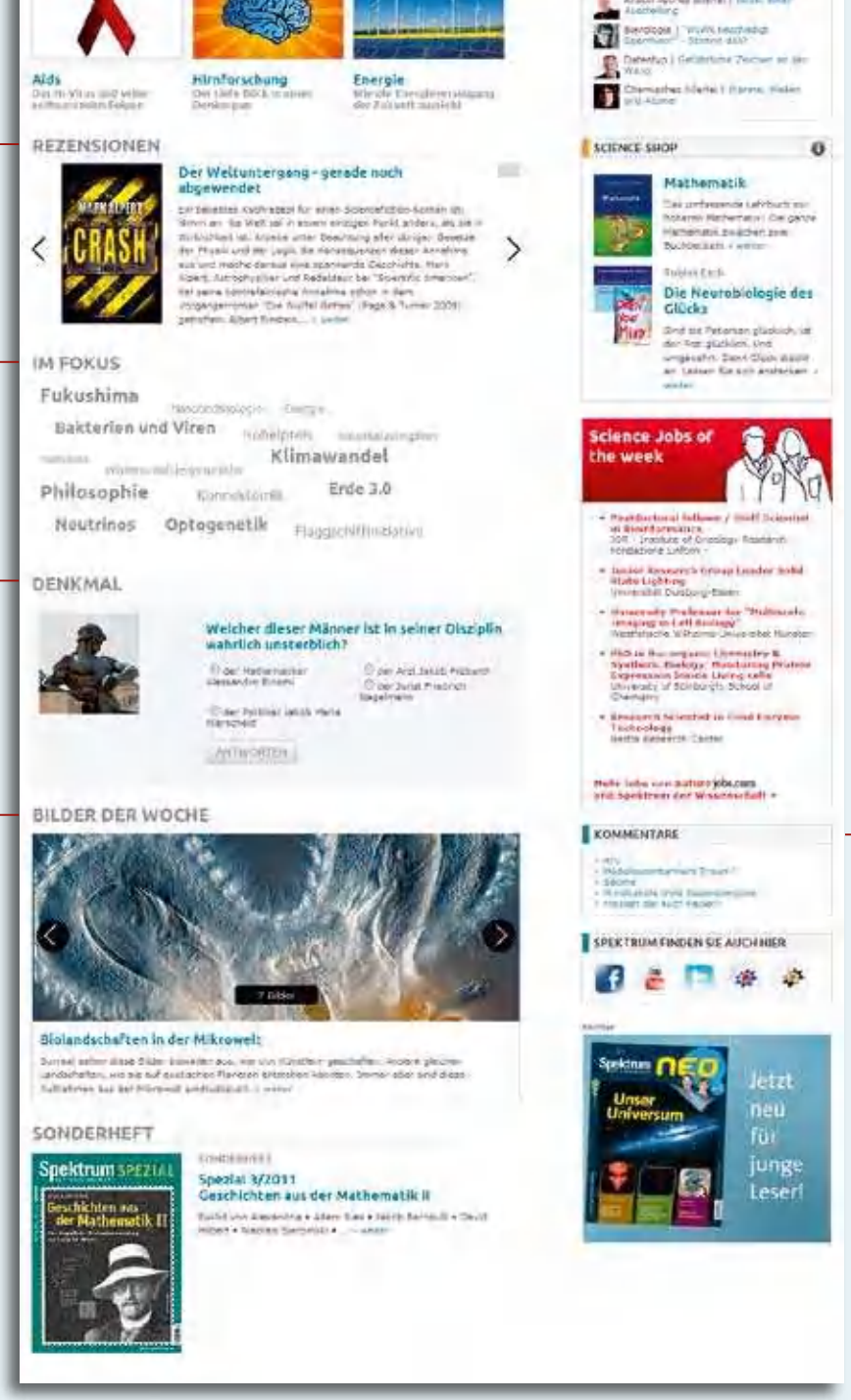
Spektrogramme:
Was passiert aktuell in der Wissenschaft? Über welche neuen Studien wird heute diskutiert? Aus der Vielzahl der weltweiten Forschungsergebnisse suchen die Spektrum.de-Redakteure die wichtigsten heraus und bringen sie für Sie auf den Punkt.

Rezensionen:
Ob Lehr- oder Sachbuch, Experimentierkasten oder DVD mit Anspruch – Experten und Journalisten bewerten auf Spektrum.de Neuerscheinungen aus Wissenschaft und Technik.

Im Fokus:
Aktuelle Stichworte weisen Ihnen den Weg zu unseren Hintergrundartikeln und Sonderseiten.

Denkmal:
Hier stellen wir Fragen, bei denen Sie um die Ecke denken müssen. Testen Sie Ihr Wissen – und lernen Sie durch die ausführlichen Antworten unserer Autoren dazu!

Bilder der Woche:
Manchmal ist Wissenschaft im wörtlichen Sinn Einsicht, ja Faszination. Die Spektrum.de-Redakteure wählen die besten Bilder aus der Forschung aus und erklären die Zusammenhänge.



Webwatch:
Jeden Tag arbeiten sich die Spektrum.de-Redakteure durch Hunderte von Nachrichten – und fischen dabei immer wieder Perlen aus dem Netz. Ob ein bsonders kluger Blogpost, ein neues Informationsangebot oder ein lustiges Forschervideo: Diese Fundstücke möchten wir mit Ihnen teilen. Ein kurzer Kommentar der Redaktion weist Ihnen die Wege in das WorldWideWeb.

SciLogs:
Der Verlag Spektrum der Wissenschaft hat 2007 das größte Netzwerk von bloggenden Wissenschaftlern im deutschsprachigen Internet gegründet. Die aktuellsten Beiträge der SciLogs finden Sie auch auf Spektrum.de.

Kommentare:
Hier werden die neuesten Leserbriefe angezeigt. Treten Sie mit uns in Dialog!

JEN CHRISTIANSEN, NACH: HAGMANN, P., SPORNS, O. ET AL.: MAPPING THE STRUCTURAL CORE OF HUMAN CEREBRAL CORTEX. IN: PLOS BIOLOGY 6, S. 1479–1493, 2008, FIG. 3C MITTE

Kausalität versus Zufall

Carl Zimmer versuchte, die Funktion unseres Gehirns mit Hilfe der Komplexitätstheorie zu erklären. (»Das Gehirn als Netzwerk«, Oktober 2011, S. 22)

Karl-Heinz Schack, Minden: Der Zeitpunkt des Feuerns einer einzelnen Nervenzelle in einer Nährlösung mag bei genauer Kenntnis der molekularen Abläufe unter Berücksichtigung der brownschen Molekularbewegung und eventueller Quanteneffekte beim Ladungsaustausch zwischen einzelnen Molekülen streng kausal ablaufen. Von außen betrachtet wird der Abstand zwischen zwei Impulsen stets nicht vorhersehbaren Schwankungen unterliegen. Wenn in einer Schaltung, die Zufallszahlen mittels radioaktiven Zerfalls erzeugt, die Impulse des Zählrohrs durch die Impulse einer einsamen Nervenzelle ersetzt werden, sollte diese Schaltung nach wie vor Zufallszahlen erzeugen.

Das virtuelle Gehirn zeigt unterschiedliche Muster. Unabhängig von der Art der Verknüpfung sind diese Muster jedoch auf jeden Fall reine Zufallsmuster – unter der Voraussetzung, dass die einzelnen »Neurone« wie echte Nervenzellen ähnlich zufällige Impulse liefern und nicht etwa auf eine feste Zyklenzahl eingestellt sind.

Das Verhalten realer Wesen kann nicht nur als zufällig betrachtet werden. Hier stellt sich nun die Frage, welche Bedeutung diese zufälligen Impulse in einem realen Gehirn haben. Ist das lediglich so etwas wie ein unterschwelliges Rauschen ohne Bedeutung, das nicht bewusst wird? Ermöglichen die Impulse im multiplikativen Zusammenwirken mit einem realen Gehirn eventuell Kreativität? Oder sind sie zusammen mit weiteren Faktoren eine Voraussetzung für den freien Willen?

Wenn diese Impulse in einem echten Gehirn mehr als ein unterdrücktes Rauschen darstellen, ist das zumindest ein starkes Indiz dafür, dass sich die geistigen Abläufe im menschlichen Bewusstsein kaum streng kausal erklären lassen.

Gelangt fremde RNA auch ins Erbgut?

Aufgenommene Nukleinsäuren haben biologische Wirkungen. (»RNA aus der Nahrung beeinflusst Cholesterinspiegel«, Spektrogramm, November 2011, S. 10)

Bernhard Abmayr, Dormitz: Gerade für die Beurteilung der Gefahren der Gentechnik ist dieser Artikel hochinteressant. Wenn fremde RNA-Schnipsel die Funktionen im eigenen Körper beeinflussen können, liegt doch die Vermutung nahe, dass bei Veränderung der fremden RNA auch dieser Einfluss sich verändert oder neu entstehen könnte. Auf die natürlichen RNA-Schnipsel hat sich der Körper in langer Evolution einstellen können. Wer kann aber abschätzen, wie gentechnisch veränderte RNA-Schnipsel wirken werden? Könnte es sogar sein, dass unser Körper in vielfacher Weise auf frem-

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.)
Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser (Monatshefte), Dr. Gerhard Trageser (Sonderhefte)
Redaktion: Thilo Körkel (Online-Koordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke
E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Editor-at-Large: Dr. Reinhard Breuer
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Redaktionsassistenz: Anja Albat-Nollau, Britta Feuerstein
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114
Verlagsleiter: Richard Zinken
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Rainer Kayser, Dr. Andreas Nestke
Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 7,90 (D/A) / € 8,50 (L) /sFr. 14,–; im Abonnement € 84,– für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Die Preise beinhalten € 8,40 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 8,40 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e.V. erhalten SdW zum Vorzugspreis.
Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Marianne Dölz; Anzeigenleitung: Marco Buch, Tel. 0211 887-2483, Fax 0211 887 97-2483; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Hamburg: Matthias Meißner, Brandstwiete 1, 6. OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-210, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: Matthias O. Hütköper, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2053, Fax 0211 887-2099; Frankfurt: Thomas Wolter, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 2424-4507, Fax 069 2424-4555; München: Jörg Bönsch, Nymphenburger Straße 14, 80335 München, Tel. 089 545907-18, Fax 089 545907-24; Kundenbetreuung Branchenteams: Tel. 0211 887-3355, branchenbetreuung@iqm.de
Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 33 vom 01.01. 2012.
Gesamtherstellung: L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2012 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.
Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
75 Varick Street, New York, NY 10013-1917
Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven Inchcoombe, Vice President, Operations and Administration: Frances Newburg, Vice President, Finance, and Business Development: Michael Florek, Managing Director, Consumer Marketing: Christian Dorbandt, Vice President and Publisher: Bruce Brandfon

Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

PRESSE Fachhandel

de RNA angewiesen ist? Welche Folgen hätte eine solche Erkenntnis für die Produktion von Nahrungsmitteln, besonders von gentechnisch veränderten Nahrungsmitteln und von Kunstnahrung, bei der diese Informationen fehlen oder verändert wurden?

Wenn nun solche fremde RNA in unsere Zellen eindringt, stellt sich auch die Frage, ob Teile davon gelegentlich in unser Erbgut eingebaut werden. Bei Bakterien und anderen niederen Lebewesen ist ein horizontaler Gentransfer ja längst nachgewiesen.

Ehrenrettung der Naturphilosophie

Die Quantenphysik verändert das philosophische Denken, so der Philosoph Michael Esfeld. (»Das Wesen der Natur«, Juni 2011, S. 54)

Walter Weiss, Kassel: Wenn man als Inhalt der so genannten Naturphilosophie eine Reihe von Fragen nennt und dann den Schluss zieht, die moderne Quantenphysik beantworte heute diese Fragen, bleibt vom Anspruch einer philosophischen Institution nichts mehr übrig. Aus der Sicht des Autors ist damit die Naturphilosophie überflüssig geworden. Sie wäre nichts als eine überholte Station in der Entwicklung der Philosophie. Leider lässt der Verfasser wesentliche Aspekte kurzerhand aus:

(1) Die klassische Physik befasst sich mit dem Raum, der durch die Reichweite unserer körperlichen Sinne gebildet wird. Diesen Raum mit allen seinen Auswirkungen verstehen wir spontan und ohne jede Erklärung.

(2) Die moderne Physik strebt über diesen Raum und seine Grenzen hinaus. Sie drückt die dort jenseits der Grenzen gefundenen Erkenntnisse in mathematischen Formeln aus. Diese Erkenntnisse der modernen Physik können wir also mathematisch erklären – verstehen können wir sie nicht. Das zeigt sich an den ausufernden Versuchen vieler Physiker und Wissenschaftsschreiber, sie uns durch immer neue Beispiele verständlich zu machen.

(3) Solche Versuche sind aussichtslos, denn unser Verstand ist genetisch untrennbar mit der Reichweite unserer körperlichen Sinne verknüpft. Er ist wahrscheinlich – günstigstenfalls – nichts anderes als ein abstrahiertes Abbild der Umwelt in diesem Maß. Für weitere Entwicklungen unseres Verstands hätte die gengeschichtlich lächerlich kurze Zeit seit »Out of Africa« niemals gereicht.

(4) Richtig verstanden wäre also eine Naturphilosophie, die diesen Namen verdient, nichts anderes als die Erkenntnis dessen, dass unser gesamtes Weltverständnis einzig und allein auf unseren antiquierten Körpersinnen beruht, auf die alle weiteren Überlegungen, gerade auch die der modernen Physik und anderen Naturwissenschaften, projiziert sind. Da diese Überlegungen und Erkenntnisse jeweils, bevor sie zum anerkannten Wissensstand gezählt werden, durch Experimente und Beobachtungen bekräftigt und bestätigt werden müssen, ergibt sich als Resümee die Notwendigkeit einer Kontinuität zwischen dem Raum der Reichweite unserer körperlichen Sinne und dem jenseits davon liegenden Bereich.

Das sind doch recht beachtliche Ergebnisse einer Naturphilosophie – die im Übrigen allen anderen Philosophien haushoch überlegen ist, denn sie beruht allein auf unserer Denkfähigkeit, der Mathematik und Darwins Evolutionslehre und nicht auf Derivaten wie Sprache, Religion und sonstigen Weltanschauungen.

Prozentuale Zahlenverwirrung

Ewen Callaway berichtete, dass der moderne Mensch wichtige Gene von ausgestorbenen Verwandten übernommen hat. (»Archaische DNA erhellt Evolutionsgeschichte des Menschen«, Forschung aktuell, November 2011, S. 12)

Werner Fuß, Garching: Die Entzifferung von fossiler DNA stellt eine neue Qualität in der Stammbaumforschung dar und eröffnet faszinierende Möglichkeiten. Die Aussage, »dass Menschen, die außerhalb Afrikas leben, etwa vier Prozent ihres Erbguts mit (dem Neandertalergenom) gemeinsam haben«, kann aber wohl nicht stimmen, wenn die Übereinstimmung zwischen Mensch und Schimpanse fast 99 Prozent beträgt.

Antwort der Redaktion:
Ihr Einwand ist berechtigt. Der Widerspruch resultiert aus der im Artikel verwendeten verkürzten Formulierung. Gemeint war, dass vier Prozent der Gene, die beim Neandertaler vom Erbgut heutiger Afrikaner abweichen, im Genom moderner Nichtafrikaner vorkommen. Diese präzise Aussage ist natürlich sehr umständlich. Deshalb hat der Autor des Beitrags die verkürzte Formulierung verwendet.

FOLGEN SIE UNS IM INTERNET

facebook
www.spektrum.de/facebook

YouTube
www.spektrum.de/youtube

studiVZ
www.spektrum.de/studivz

twitter
www.spektrum.de/twitter

BRIEFE AN DIE REDAKTION

... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf www.spektrum.de/leserbriefe oder schreiben Sie mit Ihrer kompletten Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Leserbriefe
Sigrid Spies
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

Die vollständigen Leserbriefe und Antworten der Autoren finden Sie ebenfalls unter www.spektrum.de/leserbriefe

PHYSIK

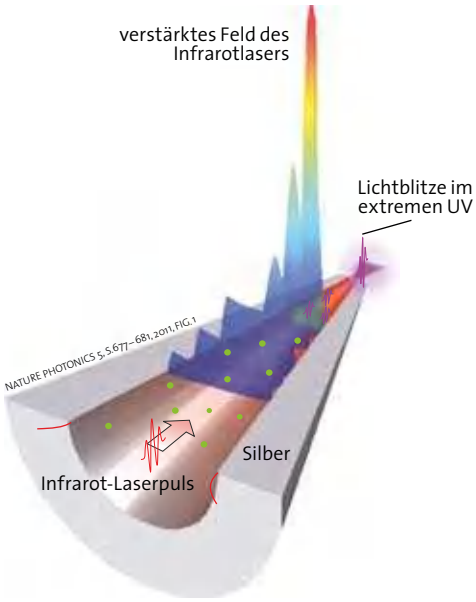
Silbertrichter erzeugt Salven aus extrem kurzen UV-Pulsen

Ein internationales Forscherteam um Seung-Woo Kim vom Korea Advanced Institute of Science and Technology (Daejeon, Südkorea) hat ultrakurze Lichtpulse im extremen Ultraviolett erzeugt, die sich 75 Millionen Mal in der Sekunde wiederholen. Die Wissenschaftler verwendeten dazu einen wenige Mikrometer langen Trichter aus Silber, durch den sie das Edelgas Xenon strömen ließen. Der Silbertrichter verstärkt das elektrische Feld eines eingestrahlten Infrarotlasers bis zu 350-fach, was die Xenonatome zur Aussendung von ultrakurzen UV-Blitzen anregt, die um zwei Größenordnungen intensiver sind als mit bisherigen Verfahren erzielbar. Man benötigt sie etwa, um die Bewegung von Elektronen in Molekülen oder Festkörpern zu erfassen.

Bei dem Verfahren erzeugt ein Laser durch Wechselwirkung mit Materie Licht vielfach höherer Frequenzen. Hierfür muss das elektrische Feld des Lasers extrem stark sein, wofür der Silbertrichter sorgt. Das eingestrahlte Laserlicht ruft in ihm Ladungsschwankungen hervor, quasi die Fortsetzung der Lichtwelle mit anderen Mitteln. Diese Oberflächenschwingungen laufen an der Innenseite des Trichters entlang auf sein verjüngtes Ende zu, bis sein Durchmesser eine halbe Wellenlänge unterschreitet. Hier werden die Schwingungen reflektiert und bilden zusammen mit den nachkommenden eine stehende Welle, deren elektrisches Feld nach Angaben der Forscher bis zu 350-fach intensiver ist als das des ursprünglichen Laserlichts.

Das elektrische Feld entreißt den Xenonatomen im Innern des Trichters Elektronen und beschleunigt sie. Sobald sich die Phase der Welle umkehrt, fliegen die Elektronen zu ihren Ursprungsatomen zurück, verbinden sich wieder mit ihnen und geben die dabei frei werdende Energie in Form höherfrequenter Strahlung ab – in diesem Fall extremes UV-Licht. Jeder Puls des Anregungslasers erzeugt einen zugehörigen UV-Blitz, so dass sich die Zahl der Blitze pro Sekunde auf bis zu 75 Millionen steigern lässt.

Nature Photonics 5, S. 677–681, 2011



Der mit Xenonatomen (grün) gefüllte Trichter verstärkt das Feld (Wellenstruktur) des einfallenden Infrarotlasers.

BOTANIK

Wind diktiert Baumwachstum

Ein Baum wächst fast immer so, dass die Gesamtquerschnittsfläche der Zweige in jeder Höhe über dem Boden der Dicke des Stamms gleicht, stellte Leonardo da Vinci bereits vor 500 Jahren fest. Christophe Eloy von der Université de Provence in Marseille (Frankreich) hat nun geklärt, warum das so ist: Bäume trotzen so dem Wind mit einem Minimum an Biomasse.

Teilt sich ein Baumstamm mit dem Durchmesser D in *n* Äste mit den Durchmessern d_1, d_2, … d_n, so muss die Summe ihrer quadrierten Durchmesser dem Stammdurchmesser zum Quadrat entsprechen: $D^2 = \Sigma\, d_i^2$, wobei i = 1, 2, … *n*. Für Messungen an echten Bäumen ergibt sich ein Exponent (in der Gleichung: 2) zwischen 1,8 und 2,3.

FOTOLIA / MAJENA UND PHILIPP K.

Wie sich das Geäst eines Baums formt, gehorcht mathematischen Regeln.

Der Physiker simulierte nun einen Baum im Computer als einseitig – im Boden – fixierten Balken (Stamm) mit einem fraktalen Netzwerk (Geäst) darauf. Die simulierten Äste teilen sich darin stets in die gleiche Anzahl von Zweigen auf, mit etwa gleichen Winkeln und Ausrichtungen. Den Wind modellierte er als Kraft, die am oberen Ende des virtuellen Baums angreift.

Es zeigte sich, dass der virtuelle Baum dem Wind am besten widersteht, wenn er gemäß da Vincis Regel wächst. Zudem berechnete Eloy, welche Kräfte auf die Äste wirken und wie dick diese sein müssen, damit sie den Kräften standhalten. So konnte der Forscher bestätigen, dass der Exponent in der »Baumformel« etwa 2 beträgt.

Eloy schließt daraus, dass die Da-Vinci-Regel aus der selbstähnlichen Struktur von Bäumen folgt, wobei die Astdurchmesser ideal an die Beanspruchung durch den Wind angepasst sind – bei minimalem Materialeinsatz. Zugleich verwirft er die frühere These, die Regel resultiere daraus, dass der summierte Querschnitt aller Wasser leitenden Gefäße von den Wurzeln hin zur Baumkrone gleich bleiben müsse.

arXiv:1105.2591v2

ANTHROPOLOGIE

Homo sapiens kam früher nach Europa

Laut bisherigen Fossiliendatierungen wanderte der moderne Mensch vor etwa 40 000 Jahren, zu Beginn der jüngeren Altsteinzeit, nach Europa ein. Neue Untersuchungen zeigen nun, dass *Homo sapiens* schon einige Jahrtausende früher in Süd- und Westeuropa eintraf und sich zudem rasch auf dem ganzen Kontinent ausbreitete.

1964 hatten Archäologen Überreste von Muscheln, Steinwerkzeugen und zwei Milchzähnen in der süditalienischen Grotta del Cavallo entdeckt und der Uluzzien-Kultur des Neandertalers zugeordnet. Nun erstellten Forscher um Stefano Benazzi von der Universität Wien 3-D-Computermodelle der Zähne, basierend auf Schnittbildverfahren. Anschließend analysierten sie verschiedene Merkmale, etwa die Dicke des Zahnschmelzes und den Umriss der Krone, und schlossen daraus, dass die Überreste von modernen Menschen stammen und nicht von Neandertalern. Das entkräftete auch die These, der Neandertaler habe damals bereits Muschelschmuck und ausgereifte Steingeräte gefertigt. Überdies ordneten die Forscher die Milchzähne zeitlich genauer ein, auf ein Alter zwischen 43 000 und 45 000 Jahren. *Homo sapiens* ist somit offenbar schon vor dem Beginn der jüngeren Altsteinzeit in das von Neandertalern besiedelte Europa eingewandert.

STEFANO BENAZZI, UNIVERSITÄT WIEN

Milchzahn eines modernen Menschen, etwa 44 000 Jahre alt, gefunden in der süditalienischen Grotta del Cavallo

Untermauert wird dies von einer Arbeitsgruppe um den Archäologen Tom Higham von der University of Oxford. Die Wissenschaftler bestimmten das Alter eines Kieferfragments, das 1927 in der Höhle Kents Cavern beim englischen Torquay zum Vorschein gekommen war. Sie kamen auf 41 000 bis 44 000 Jahre, entgegen früheren Datierungen, die fälschlicherweise 35 000 Jahre ergeben hatten. Damit handelt es sich um die ältesten bekannten *Homo-sapiens*-Fossilien im nordwestlichen Europa.

Nature 479, S. 521–528, 2011

ASTRONOMIE

Riesige Eisvorkommen in entstehendem Planetensystem

Die protoplanetare Gas- und Staubscheibe, die sich um den jungen Stern TW Hydrae dreht, enthält in ihren äußeren Bereichen Wassermengen, die mehrere tausend Weltmeere füllen könnten. Das haben Astronomen um Michiel Hogerheijde von der Universität Leiden (Niederlande) belegt, indem sie dort mit Hilfe des Weltraumteleskops Herschel kalten Wasserdampf nachwiesen. Zuvor war nur in den inneren, heißen Regionen von protoplanetaren Scheiben Wasserdampf entdeckt worden.

TW Hydrae ist 175 Lichtjahre von der Erde entfernt und mit seinen zehn Millionen Jahren nur rund ein 500-stel so alt wie die Sonne. Umrundet wird er von einer ausgedehnten Gas- und Staubscheibe und, wie seit 2008 bekannt, auch von mindestens einem Riesenplaneten. In den äußeren Regionen der protoplanetaren Scheibe, in denen Temperaturen um minus 250 Grad Celsius herrschen, gefriert Wasserdampf an Staubkörnern. Die ultraviolette Strahlung des Sterns lässt einen kleinen Teil des Wassers jedoch wieder verdampfen.

Die spektralen Fingerabdrücke dieses Wasserdampfs haben die Forscher um Hogerheijde nun am Rand der protoplanetaren Scheibe aufgespürt. Den Beobachtungsdaten und computergestützten Simulationen zufolge entspricht die Masse des nachgewiesenen Wasserdampfs rund fünf Tausendstel der Masse aller irdischen Ozeane. Damit diese Dampfmenge entstehen kann, muss die Scheibe laut den Berechnungen der Forscher ein Eisreservoir enthalten, das die Masse der Weltmeere mehrtausendfach übersteigt. Die Forscher hoffen, mit Hilfe dieser Ergebnisse genauer nachvollziehen zu können, wie sich Planeten bilden und zu ihren Wasservorräten kommen.

Science 334, S. 338–340, 2011

ESA / NASA, JPL / CALTECH / LEIDEN OBSERVATORY

Künstlerische Darstellung der protoplanetaren Scheibe um den Stern TW Hydrae

MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de

Aktuelle Spektrogramme
finden Sie täglich unter
www.spektrum.de/spektrogramm

QUANTENPHYSIK

Licht aus Vakuum hervorgezaubert

Der Quantenfeldtheorie zufolge ist das Vakuum nicht leer: Ständig bilden sich dort aus dem Nichts so genannte virtuelle Teilchen, die kurz darauf wieder spurlos verschwinden. Nur bei Wechselwirkung mit der Umgebung können sie sich in reale Partikel verwandeln. Wissenschaftler um Christopher Wilson von der Technischen Hochschule Chalmers im schwedischen Göteborg haben nun erstmals virtuelle Photonen in reale umgewandelt, also in messbares Licht.

Der amerikanische Physiker Gerald Moore hatte bereits 1970 die These aufgestellt, dass ein Spiegel, der sich nahezu lichtschnell bewegt, virtuelle in echte Photonen überführen könne. Allerdings lassen sich solche relativistischen Geschwindigkeiten im Labor nicht erreichen. Deshalb wählten die Forscher um Christopher Wilson eine alternative Vorgehensweise: Sie montierten an ein Ende eines Wellenleiters ein quantenelektronisches Bauteil namens SQUID (Superconducting Quantum Interference Device). Das Gerät reagiert hochempfindlich auf Änderungen des Magnetfelds und wirkt so wie ein Spiegel auf das Brodeln im Vakuum. Indem die Wissenschaftler ein Magnetfeld anlegten, das mehrere Milliarden Schwingungen pro Sekunde durchlief, zitterte der »Spiegel« mit bis zu 25 Prozent der Lichtgeschwindigkeit hin und her. Dabei antwortet er auf virtuelle Photonen, indem er reale Photonen aussendet – er materialisiert die Teilchen gewissermaßen.

Am offenen Ende des Wellenleiters konnten die Forscher die produzierten Photonen in Form von Mikrowellenstrahlung messen. Die Frequenz der Photonen entsprach etwa der Hälfte der Schwingungsfrequenz des Spiegels, so wie von der Quantentheorie vorhergesagt. In verschiedenen Tests schlossen die Autoren mögliche andere Quellen für die nachgewiesenen Photonen aus.

Neben Photonen existieren noch andere virtuelle Teilchen im Vakuum, etwa Elektronen oder Protonen. Da Lichtquanten keine Masse besitzen, sei relativ wenig Energie erforderlich, um sie aus ihrer virtuellen Existenz heraus in einen realen, messbaren Zustand zu überführen, berichten die Forscher. Im Prinzip könne man aber durch entsprechende Energiezufuhr auch andere Partikel aus dem Vakuum erzeugen.

Nature 479, S. 376–379, 2011

MEDIZIN

Blutplättchen entscheiden über Immunreaktion

Seit Langem sind die Blutplättchen als Teil des Blutgerinnungssystems bekannt, das Wunden rasch verschließt. Nun berichten Forscher um Dirk Busch von der TU München, dass Blutplättchen auch die Immunreaktion regulieren: Sie bestimmen mit darüber, ob eingedrungene Keime möglichst schnell oder besonders nachhaltig bekämpft werden.

FOTOLIA / ALEXANDR MITIUC

Neben Erythrozyten (rote Scheiben) finden sich im Blut unter anderem T-Zellen (violette Kugeln) und Blutplättchen (unregelmäßig geformte Partikel).

Wenn Bakterien in den Körper gelangen, etwa das bei Lebensmittelvergiftungen beteiligte *Listeria monocytogenes*, kann der Organismus die Keime rasch und gründlich vernichten oder aber eine langsamere, riskantere Abwehrstrategie wählen. Diese erlaubt es dem Immunsystem, die Bakterien kennen zu lernen, um für spätere Attacken besser gerüstet zu sein. Eine wichtige Rolle beim Austarieren der beiden Reaktionen spielen die Blutplättchen. Ohne sie können die Bakterien nicht in bestimmte Bereiche der Milz gelangen, wo dendritische Zellen als Immunsystemwächter auf Eindringlinge warten. Diese Zellen helfen, Erinnerungen an Keime zu speichern, mit denen sie Kontakt hatten. Dabei werden spezifische T-Zellen aktiv, die den Feind bei späteren Infektionen gezielt angreifen und somit eine langfristige Immunität gewährleisten. Die Bakterien bleiben aber offenbar nur dann in der Milz hängen, wenn die Blutplättchen zusammen mit dem so genannten Komplementsystem die Keime mit einer Hülle umgeben.

Den Bakterien Zugang zu den dendritischen Zellen in der Milz zu verschaffen, sei für den Organismus allerdings ein zweischneidiges Schwert, schreiben die Wissenschaftler. Denn für *L. monocytogenes* sind diese Zellen ein Lebensraum, von dem aus sie sich im Körper ausbreiten können. Das Risiko muss der Organismus aber wohl eingehen, um eine langfristige Immunisierung zu erreichen. Auch für andere grampositive Bakterien scheint dieser Zusammenhang zu gelten.

Nature Immunology 12, S. 1194–1201, 2011

LUFTIG, LUFTIG

Ein neues, poröses Material aus Nickelröhrchen hat eine so geringe Dichte, dass es auf einer Pusteblume schwebt. Zudem zeigt es eine für Metalle ungewöhnliche Elastizität: Selbst wenn es auf über die Hälfte seiner Dicke zusammengepresst wird, nimmt es nach Entlastung wieder seine ursprüngliche Form an. Damit könnte es breite Anwendung in Wärmeisolierungen, Schalldämmungen oder auch zum Dämpfen von Stößen und Vibrationen finden.

Tobias Schaedler von HRL Laboratories in Kalifornien und seine Kollegen fertigten zunächst ein Polymergerüst aus sich kreuzenden Säulen. Auf dieses brachten sie einen rund 100 Nanometer dünnen Nickelfilm auf und ätzten anschließend das Gerüst wieder weg. Übrig blieb eine Gitterstruktur aus wenige Millimeter langen und einige hundert Mikrometer dicken, hohlen Metallröhrchen. Insgesamt macht das Nickel aber nur 0,01 Prozent des Materials aus – der Rest ist Luft. Diese nicht mitgerechnet, beträgt die Dichte sogar nur 0,9 Milligramm pro Kubikzentimeter, also weniger als jene von Luft auf Meeresspiegelhöhe.

Science 334, S. 962–965, 2011

HRL LABORATORIES, LLC / FOTO: DAN LITTLE

MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de

Weitere faszinierende
Bilder aus der Forschung unter

www.**spektrum.de**/bilder

TEILCHENPHYSIK

Verwandlung im Untergrund

Dass sich unterschiedliche Neutrinos ineinander umwandeln können, ist schon seit 1998 bekannt. Der direkte Nachweis solcher Oszillationen steht aber noch aus. Nun nähern sich internationale Forscherteams dem Durchbruch.

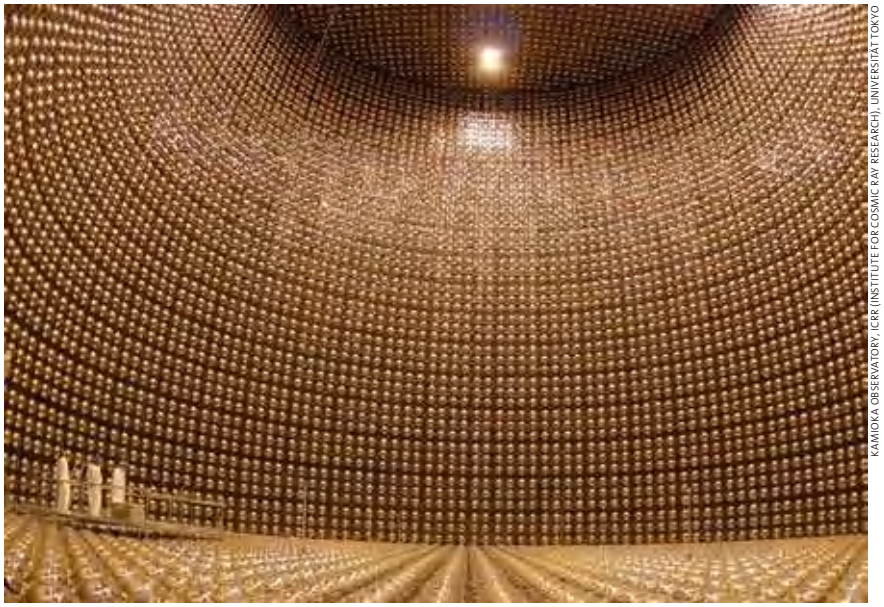
VON GEORG WOLSCHIN

Neutrinos haben das Zeug dazu, den Teilchenphysikern den Weg in eine »neue Physik« zu weisen. Sie besitzen Eigenschaften, die das Standardmodell der Elementarteilchenphysik nicht unmittelbar vorhersagt, und könnten Aufschluss darüber geben, warum Materie und Antimaterie im Universum so ungleich verteilt sind. Kein Wunder, dass Forscher in aller Welt die Eigenschaften der »Geisterteilchen« genau bestimmen wollen. Jüngst nun vermeldeten die Forscher des T2K-Experiments in Japan neue Ergebnisse. Wäre es dort nicht im März 2011 zu dem großen Erdbeben gekommen, hätten die Wissenschaftler sogar noch mehr Daten veröffentlichen können.

Drei Neutrinoarten existieren in der Natur: das Elektron-Neutrino, das Myon-Neutrino und das Tau-Neutrino. Dank Messungen am japanischen Super-Kamiokande-Detektor wissen wir seit 1998, dass diese Teilchen oszillieren, sich also ineinander umwandeln können. Dieser Effekt hatte jahrzehntelang für Verwirrung unter Physikern gesorgt. So kommen von den Elektron-Neutrinos, die bei Kernfusionsprozessen in der Sonne entstehen, viele als Myon-Neutrinos auf der Erde an. Die Folge: Detektoren, die nur Elektron-Neutrinos nachweisen, registrieren gemessen an theoretischen Vorhersagen zu wenige von ihnen – ein vermeintliches »solares Neutrino-Defizit«, das schon seit den 1960er Jahren bekannt war. Einen analogen Effekt hatten die Super-Kamiokande-Forscher 1998 bei der Umwandlung von Myon-Neutrinos, die beim Einfall kosmischer Strahlung in die Erdatmosphäre entstehen, in Tau-Neutrinos beobachtet.

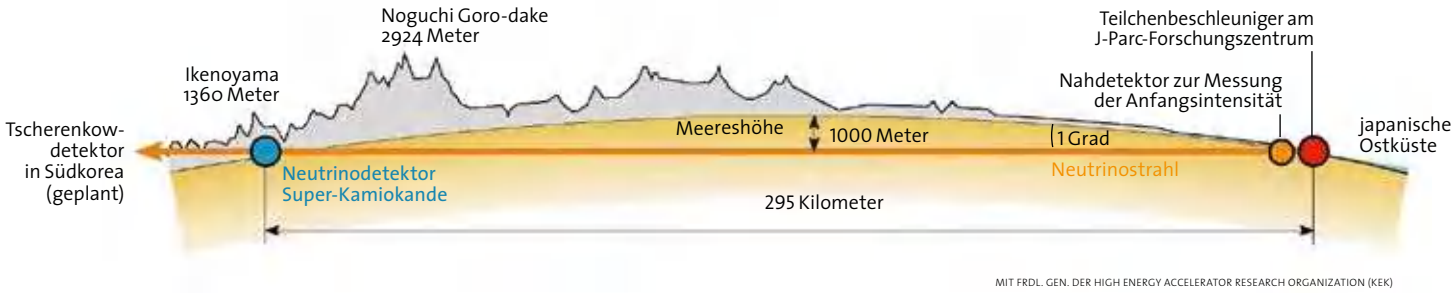
Alle drei Neutrinoarten sind ungeladen, besitzen sehr geringe Massen (einige Millionstel der Elektronenmasse oder weniger) und reagieren neben der Gravitation nur auf die schwache Wechselwirkung. Nach welchen Regeln die Teilchen oszillieren, hängt von den bisher nicht genau bekannten Neutrinomassen und den so genannten Mischungswinkeln ab. Diese sind ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, mit der sich ein Neutrino der einen Art in einen Vertreter einer anderen Art umwandelt. Zwei der drei Mischungswinkel sind experimentell bereits mit einiger Genauigkeit ermittelt worden; der dritte (θ_{13}, Theta-13) fehlt.

Bislang ließ sich das Phänomen der Oszillation aber nur indirekt nachweisen. Forscher registrierten stets das Verschwinden der ursprünglichen Neutrinoart, nicht jedoch das Auftauchen der jeweils neuen. Derzeit wollen mehrere große Forschergruppen den direkten Nachweis nachholen. Sehr weit fortgeschritten ist dabei die T2K-Gruppe (Tokai-to-Kamioka). Die etwa 500 Wis-



KAMIOKA OBSERVATORY, ICRR (INSTITUTE FOR COSMIC RAY RESEARCH), UNIVERSITÄT TOKYO

Der Neutrinodetektor Super-Kamiokande ist in einem ehemaligen Bergwerk bei der Stadt Kamioka (heute: Hida) errichtet. 11 200 Photomultiplier bedecken die Wände des rund 40 mal 40 Meter messenden Instruments; sie registrieren die von Neutrinos verursachten Lichtblitze. 1998 wurde hier der erste Nachweis der Neutrinooszillation erbracht. Damit war klar: Entgegen den damaligen Annahmen besitzen diese Teilchen Masse.



MIT FRDL. GEN. DER HIGH ENERGY ACCELERATOR RESEARCH ORGANIZATION (KEK)

Die 295 Kilometer lange Neutrino-Flugstrecke zwischen dem japanischen Beschleunigerzentrum J-PARC und dem Neutrinodetektor Super-Kamiokande führt in bis zu 1000 Meter Tiefe durch die Erdkruste. Dabei wandeln sich einige der von einem Beschleuniger erzeugten Myon-Neutrinos in Elektron-Neutrinos um, die im Detektor gemessen werden. Auf ähnliche Weise arbeiten auch OPERA (dabei fliegen die Neutrinos vom europäischen Teilchenforschungszentrum CERN bei Genf zum italienischen Untergrundlabor Gran Sasso) und MINOS (vom Fermilab in Illinois zum Untergrundlabor Soudan in Minnesota).

senschaftler aus der ganzen Welt nutzen keine natürliche Neutrinoquelle, sondern einen künstlich erzeugten Strahl aus Myon-Neutrinos (Grafik oben). Er stammt aus einem Linearbeschleuniger des J-PARC-Forschungszentrums in Tokai an der japanischen Ostküste. Von hier aus reisen die Myon-Neutrinos 295 Kilometer weit durch die Erdkruste zum Super-Kamiokande-Neutrinodetektor im Westen Japans.

Am 11. März 2011 wurden die Messungen unterbrochen, als Japan zunächst von einem Erdbeben erschüttert und anschließend durch einen Tsunami getroffen wurde. Der an der östlichen Steilküste gelegene Beschleuniger erlitt leichte Erdbebenschäden und wurde vorübergehend stillgelegt. Allerdings war er tsunamisicher, anders als die zerstörten Kernkraftwerke in Fukushima mehr als 100 Kilometer weiter nördlich. Bis Anfang 2012 soll der Schaden beseitigt sein und der Betrieb wieder aufgenommen werden. In der bisherigen Laufzeit des Experiments von Januar 2010 bis März 2011 registrierte der Super-Kamiokande 88 Neutrinoereignisse. Sechs davon ließen sich klar als Elektron-Neutrinos (siehe auch Bild auf S. 18) identifizieren, die durch Oszillationen aus Myon-Neutrinos hervorgegangen waren, schrieb die T2K-Forschergruppe im Juli 2011 im Fachmagazin »Physical Review Letters«.

Eine der in diesem Zusammenhang wichtigsten Messgrößen ist der Mischungswinkel θ_{13}. Die T2K-Forscher haben dafür einen Wert ermittelt, der ein wenig größer ist als erwartet, sich aber mit den theoretischen Modellen noch verträgt. Er muss jetzt durch unabhängige Messungen bestätigt werden. Würden sich Myon-Neutrinos nicht in Elektron-Neutrinos verwandeln können, betrüge der Winkel null Grad.

Warum finden wir im Universum praktisch keine Antimaterie vor?

Ein weitere entscheidende Frage ist die, in welchem Maß Neutrinos einer grundlegenden Symmetrie der Natur gehorchen: der Ladungsparitätssymmetrie (CP- oder Charge-Parity-Symmetrie). Bei dieser Transformation tauscht man jeweils ein Teilchen durch sein Antiteilchen aus und umgekehrt, wobei unter anderem die Ladung der Teilchen ihr Vorzeichen wechselt, und nimmt überdies eine Raumspiegelung vor, vertauscht also oben und unten sowie links und rechts. Dann prüft man, ob sich das Resultat der Transformation genauso verhält wie das Original, beide also symmetrisch sind. Als Maß der Symmetrie nutzen die Physiker eine Größe namens δ_{CP} (Delta-CP). Sie soll ihnen verstehen helfen, warum wir im Universum praktisch nur Materie, aber so gut wie keine Antimaterie vorfinden, obwohl beide nach gängiger Theorie einst zu gleichen Teilen entstanden.

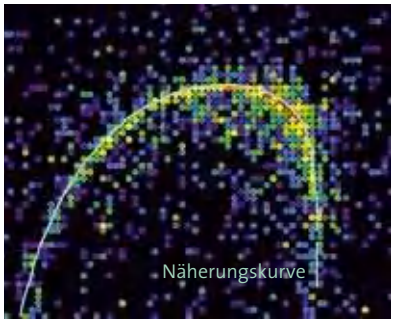
Für das T2K-Experiment erzeugen die Forscher im Beschleuniger zunächst gepulste Protonenstrahlen mit bis zu $9 \cdot 10^{13}$ Protonen pro Puls. Diese werden in ein Synchrotron und dann weiter in den Hauptbeschleunigerring geleitet, der sie schließlich auf eine Energie von 30 Milliarden Elektronvolt beschleunigt. Anschließend lenken Magnetfelder die Partikel so aus dem Ring, dass sie auf den weit entfernten Super-Kamiokande zielen. Zunächst einmal prallen sie aber auf einen Graphitstab mit 2,6 Zentimeter Durchmesser und 90 Zentimetern Länge. Dabei entstehen zumeist Pionen und Kaonen. Auf ihrem Flug durch einen 96 Meter langen Tunnel zerfallen diese vor allem in Myonen, die schweren Verwandten der Elektronen, und Myon-Neutrinos. Der Zerfall erfolgt überwiegend in Vorwärtsrichtung, so dass das Ziel, der Super-Kamiokande, weiter im Fokus bleibt.

Das Zentrum des Strahls zielt allerdings etwa 2,5 Grad unter den Detektor. Das Instrument selbst wird also nur von einer »Off-Axis«-Strahlkomponen-

Lichtblitze im Wassertank

Während des Betriebs ist der Neutrinodetektor Super-Kamiokande mit 50 000 Tonnen hochreinem Wasser gefüllt. Treten Neutrinos in Wechselwirkung mit dem Wasser, registrieren die Photomultiplier an den Wänden so genannte Tscherenkow-Lichtblitze.

Unterscheiden lassen sich die Teilchenarten, weil die von einfallenden Elektron-Neutrinos erzeugten Elektronen andere Lichtkegel bilden als die von Myon-Neutrinos erzeugten Myonen. Jeder farbige Punkt im Foto entspricht einem Photomultiplier, der einen Lichtblitz – in diesem Fall von einem Elektronenereignis – registriert hat.



MIT FRDL. GEN. DER T2K KOLLABORATION UND DES KAMIOKA OBSERVATORY, ICRR, UNIVERSITÄT TOKYO

te getroffen. Doch genau darin befinden sich besonders viele Neutrinos mit vergleichsweise niedriger Energie, und für diese ist die Oszillationswahrscheinlichkeit besonders hoch.

Bevor der Myon-Neutrinostrahl auf die Reise geht, durchläuft er noch einen Detektor, der die anfängliche Intensität des Neutrinoflusses misst (siehe Grafik S. 17). Seine zwei Komponenten vermessen den zentralen Strahl sowie den Off-Axis-Anteil. Mit letzterer Messung lässt sich vor allem die Zahl der im entfernten Detektor zu erwartenden Myon-Neutrinos bestimmen. Dabei müssen Myon-Neutrinos berücksichtigt werden, die durch Oszillationen verloren gehen, aber auch Elektron-Neutrinos, die den anfänglichen Strahl verunreinigen, wenngleich er immerhin zu über 99 Prozent aus Myon-Neutrinos besteht. Modellrechnungen zufolge wären im Messzeitraum aber lediglich 1,5 solcher Untergrundereignisse zu erwarten gewesen. Bei derzeit sechs nachgewiesenen Elektron-Neutrinos beträgt die Wahrscheinlichkeit, dass diese tatsächlich auf Oszillationen von Myon-Neutrinos zurückzuführen sind, 99,3 Prozent.

Das legt den Schluss nahe, dass die T2K-Forscher tatsächlich die Oszillation zwischen Myon- und Elektron-Neutrinos direkt nachgewiesen haben, indem sie das »Erscheinen« einer anderen Neutrinoart registrierten. Allerdings ist die Zahl der Messungen noch zu gering – insgesamt wollen die T2K-Forscher 50-mal mehr Daten erheben. In der Teilchenphysik gilt eine Messung erst dann als zuverlässig, wenn sie eine so genannte statistische Signifikanz von fünf Standardabweichungen aufweist. Je höher dieser Wert, desto sicherer können die Physiker sein, dass kein Zufall im Spiel ist. Im T2K-Experiment beträgt die Signifikanz erst 2,5 Standardabweichungen.

Als Myon-Neutrino gestartet, als Tau-Neutrino angekommen

Unterdessen erhielt das Team aber Unterstützung aus den USA. Am Fermilab im Bundesstaat Illinois erzeugen Kollegen vom MINOS-Experiment ebenfalls einen Strahl aus Myon-Neutrinos, um ihn im unterirdischen Soudan-Detektor in Minnesota nachzuweisen. Im Juni 2011 berichteten die Forscher, auf mehr Elektron-Neutrinos gestoßen zu sein, als ohne Oszillationen zu erwarten gewesen wären. Allerdings liegt die Signifikanz ihrer noch nicht publizierten Ergebnisse bei bisher nur 1,7 Standardabweichungen.

Schon vor einiger Zeit sind auch die Forscher von OPERA fündig geworden. Mittels eines Teilchenbeschleunigers am europäischen Teilchenforschungszentrum CERN bei Genf erzeugen sie Myon-Neutrinos, die sich auf ihrem Weg in den 730 Kilometer entfernten OPERA-Detektor im italienischen Gran-Sasso-Laboratorium in Tau-Neutrinos umwandeln. Im Fachmagazin »Physics Letters B« hatten sie bereits 2010 über die Entdeckung eines solchen Tau-Ereignisses berichtet. Auch ihr Resultat könnte daher als erster direkter Oszillationsnachweis für Neutrinos gelten, wenn es sich bestätigen lässt. Die statistische Signifikanz beträgt bisher 2,4 Standardabweichungen. Das OPERA-Experiment machte übrigens im vergangenen September Schlagzeilen, als es möglicherweise Neutrinos mit Überlichtgeschwindigkeit beobachtete. Viele Forscher bezweifeln das jedoch – die intensive Suche nach möglichen Fehlerquellen könnte Jahre dauern.

Neben dem dritten Mischungswinkel und dem Wert von δ_{CP} beschäftigt die Neutrinoforscher eine weitere Frage. Sie hängt damit zusammen, dass die Massezustände eines Neutrinos sich quantenphysikalisch aus einer Überlagerung der drei Neutrinoarten ableiten lassen, so wie auch die Neutrinoart das Ergebnis jeweils dreier einander überlagernder Massezustände ist. Die Forscher wollen nun die so genannte Hierarchie (Abfolge) der Massezustände untersuchen. Für diesen Zweck ist es am besten, den Weg des Neutrinostrahls durch die Erde zu verlängern und sowohl Experimente mit Myon-Neutrinos als auch mit Antineutrinos durchzuführen. Denn beim Durchgang durch Materie besitzen Neutrinos und Antineutrinos unterschiedliche Oszillationswahrscheinlichkeiten.

Der T2K-Neutrinostrahl soll künftig daher nicht nur im Super-Kamiokande nachgewiesen werden, sondern auch in einem Tscherenkow-Detektor in Südkorea. Die noch zu errichtende Anlage wäre nahezu doppelt so groß wie der Super-Kamiokande; auf dem Weg zu ihr müssten die Teilchen rund 1000 Kilometer zurücklegen. Richtig Fahrt wird die Neutrinoforschung in Japan aber erst wieder aufnehmen, wenn die Schäden an den Anlagen und im Land behoben sind.

Georg Wolschin ist habilitierter Physiker und Wissenschaftsjournalist; er forscht in theoretischer Physik und lehrt an der Universität Heidelberg.

BIOLOGIE

Bakteriengemeinschaften im Darm

Genetiker haben das Erbgut der im menschlichen Darm lebenden Bakterien bei Probanden aus mehreren Ländern und Kontinenten analysiert. Demnach gibt es drei verschiedene Typen von Populationen. Welche davon eine Person in sich trägt, scheint überraschenderweise unabhängig von Herkunft oder Wohnort zu sein.

VON PEER BORK

Seien Sie ehrlich: Kennen Sie Ihre Blutgruppe? Doch selbst wenn man nicht genau weiß, ob man Typ A, B, AB oder 0 angehört, ist den meisten klar, dass dieser Faktor über den Erfolg von Bluttransfusionen oder Transplantationen entscheidet. Seit Kurzem gibt es nun eine analoge Klassifizierung, die sich unabhängig von Herkunft und Wohnort durch die Menschheit zieht: die der Bakterienpopulationen im menschlichen Darm, welche sich in drei verschiedene Typen einteilen lassen (Bakteroidestyp, Prevotellatyp oder Rhuminococcustyp).

Bakterien sind schon seit weit über 100 Jahren im Visier der Forscher – als Krankheitsverursacher, aber auch als Helfer wie zum Beispiel bei der Verdauung im Darm. Noch bis vor 30 Jahren ließen sich die Winzlinge nur im Mikroskop oder durch bestimmte biochemische Reaktionen sichtbar machen. Der Einsatz von Markermolekülen, in diesem Fall speziell der 16S-RNA, brachte eine ungeahnte Artenvielfalt der Bakterien zu Tage. Aber erforschen ließen sich nur jene wenigen, die bereitwillig im Labor wachsen. Dieser Anteil beläuft sich auf schätzungsweise ein Prozent aller Arten – das heißt, ein großer Teil sämtlicher existierender Lebewesen blieb uns bis vor Kurzem fast gänzlich verborgen.

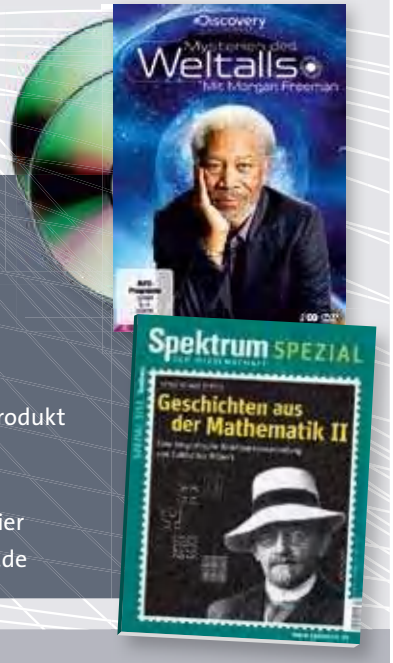
Doch die ständig billiger werdenden Technologien zur Entschlüsselung von Erbmaterial verändern heute diese Situation. An der ersten Entzifferung eines menschlichen Genoms im Jahr

www.spektrum.de/aboplus

Der Premiumbereich – exklusiv für Abonnenten von **Spektrum der Wissenschaft**

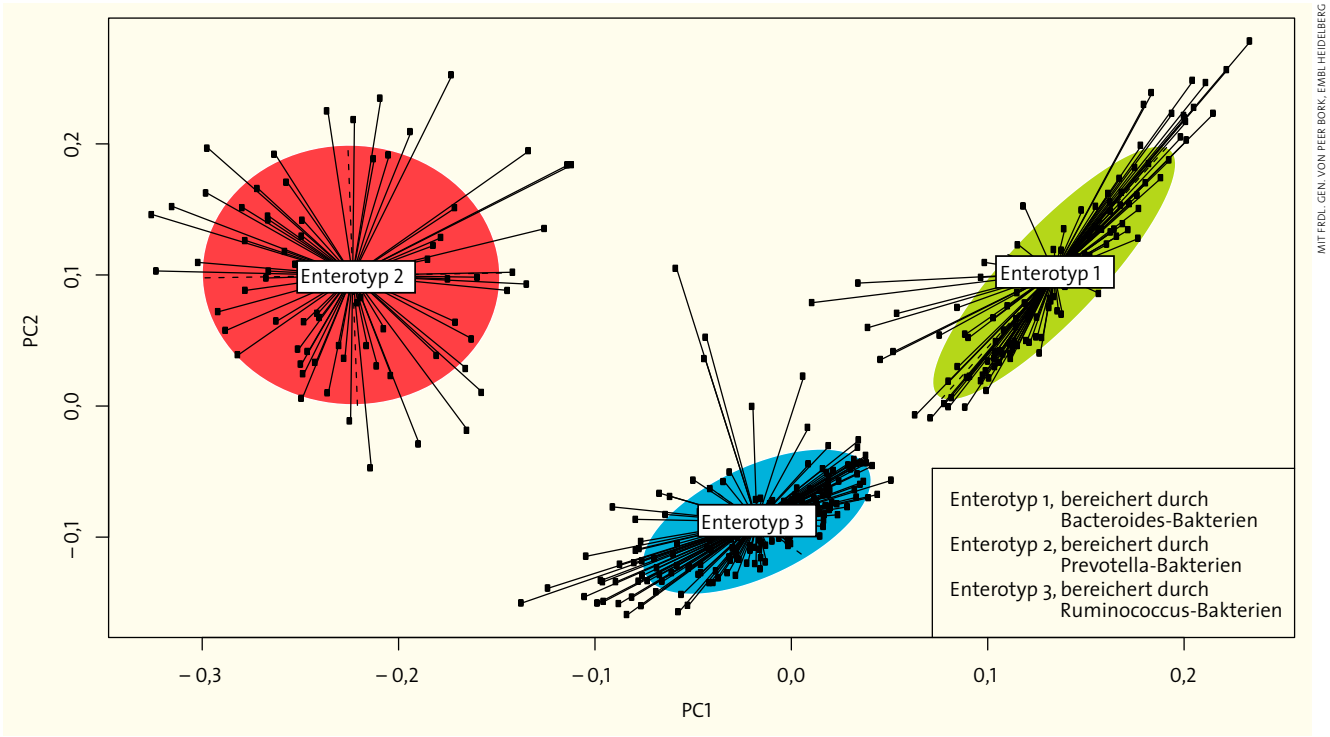
Abonnenten von **Spektrum der Wissenschaft** profitieren nicht nur von besonders günstigen Abokonditionen, exklusiv auf sie warten unter www.spektrum.de/aboplus auch eine ganze Reihe weiterer hochwertiger Inhalte und Angebote, unter anderem:

- Alle **Spektrum der Wissenschaft**-Artikel seit 1993 im Volltext
- Ein Mitgliedsausweis, dessen Inhaber in zahlreichen Museen und wissenschaftlichen Einrichtungen Vergünstigungen erhält
- Vergünstigte Sonderhefte, kostenlose Downloads und das Produkt des Monats zum Spezialpreis
- Unter allen Abonnenten verlosen wir jeden Monat vier Gutscheine im Wert von € 25,– für den Science-Shop.de



Spektrum DER WISSENSCHAFT Wissenschaft aus erster Hand

www.spektrum.de/aboplus



MIT FRDL. GEN. VON PEER BORK, EMBL HEIDELBERG

Obwohl in allen Menschen ähnliche Darmbakterien vorkommen, ist deren relative Häufigkeit in jeder Person unterschiedlich. Es haben sich aber drei Gruppen herauskristallisiert, die ungefähr vergleichbare Häufigkeitszusammensetzungen aufweisen, da bei ihnen anscheinend die Mikroflora besonders gut kooperieren kann. In dieser »Principal Component Analysis« (PCA), einer Clusteranalyse von 396 Probanden, sind die Darmbakteriengruppen (Enterotypen) – stark vereinfacht – mit Grün, Rot und Blau markiert.

2001 waren noch hunderte Wissenschaftler aus aller Welt beteiligt – auch unsere Arbeitsgruppe –, und es hat viele Jahre gedauert. Heute erledigt ein so genannter Sequenzierroboter das in wenigen Stunden, und die Kosten werden schon bald die magische Grenze von 1000 Dollar pro Genom unterschreiten.

Aufwändige Puzzlearbeit

Bakterielle Genome zu analysieren, ist allerdings noch um einiges komplizierter – besonders wenn man einen kompletten Lebensraum wie ein paar Krümel Erde, einen Tropfen Wasser oder eine Stuhlprobe untersucht. Bislang sind lediglich ein paar tausend Bakteriengenome komplett entschlüsselt. Es sind aber allein in einem Gramm Erde ein Vielfaches mehr an unterschiedlichen Arten aufzufinden. Daher weiß man erst einmal nicht, zu welcher Bakterienart ein jedes der Milliarden von kurzen Basenpaaren gehört, die aus dem Sequenzierrobotor kommen, sondern muss sie mühsam zusammenpuzzeln.

Seit 2004 lässt sich das Erbmaterial vieler Bakterien aus einem Lebensraum bestimmen – Forscher sprechen hier von Metagenomik. Die ersten Veröffentlichungen betrafen Mikroben in einem Bakterienfilm aus einer alten Mine und solche im offenen Meer nahe den Bermudas. Ende 2005 trafen sich Experten in Paris, um ein gemeinsames Vorgehen bei der Entschlüsselung des Lebensraums Mensch zu diskutieren, und Ende 2008 wurde hierfür in Heidelberg schließlich ein internationales Konsortium gegründet.

Als wichtigster Körperteil des Menschen hinsichtlich von Mikroben gilt der Darm. Immerhin trägt jeder Mensch darin etwa ein bis zwei Kilogramm Bakterien mit sich herum. Rund 100 Trillionen Bakterienzellen leben in und an uns – also zehnmal so viel wie menschliche Zellen.

Darmbakterien produzieren viele essenzielle Vitamine und erschließen für uns Teile der Nahrung. So zersetzen sie die Zellwände von Pflanzen, was unsere eigenen Verdauungsenzyme nicht können. Erste metagenomische Datensätze von Stuhlproben wurden 2006 veröffentlicht, beinhalteten aber weit weniger als 100 Megabasen, also nur rund ein Dreißigstel des menschlichen Genoms. Dank neuen Sequenziertechniken gelang 2010 ein wesentlicher Fortschritt, so dass Stuhlproben von über 100 Versuchspersonen mit jeweils etwa fünf Gigabasen sequenziert und analysiert werden konnten. Auch dies reichte zwar noch lange nicht, um die wahrscheinlich Tausende von Darmbakterien über das Erbmaterial zu klassifizieren, aber eine ungefähre Abschätzung der häufiger vorkommenden Artgenossen war nun möglich. Wir fanden bereits in dieser Probandengruppe 3,3 Millionen unterschiedliche Gene (unser menschliches Genom kodiert etwas mehr als 20 000) – oft wussten wir allerdings nicht einmal, aus welchem Organismus sie stammen.

Die Frage blieb aber, wie sich die Darmflora von Mensch zu Mensch un-

terscheidet und was die Unterschiede ausmacht: unsere Herkunft? Der Lebensstil? Die Ernährung? Die Hygiene? Das Alter? Das Geschlecht? Daher untersuchten wir im Rahmen des länderübergreifenden Projekts MetaHIT (Abkürzung für: Metagenomics of the Human Intestinal Tract) Europäer aus vier Ländern und verglichen sie mit Japanern und Amerikanern. Wir wussten bereits, dass jeder Mensch sein eigenes Bakterienrepertoire hat – aber worin sie sich voneinander unterscheiden und ob und wie sie sich gruppieren lassen, war völlig unklar.

In jeder Probe ließ sich gut die Hälfte der kleinen Sequenzschnipsel mittels bioinformatischer Verfahren bestimmten Bakteriengruppen zuordnen und auch deren ungefähre Häufigkeit ermitteln. Als der Rechner dann alle Proben auf ihre Ähnlichkeit hin untersuchte, ergaben sich drei große Gruppen, die nichts mit der Herkunft der Personen zu tun hatten. Auch andere Daten wie Alter, Geschlecht und Gewicht spielten bei der Einteilung anscheinend nur eine untergeordnete Rolle. Wir können derzeit lediglich spekulieren, worauf die Gruppierung beruht.

Reger Informationsaustausch in unserem Darm

Jede der drei Populationszusammensetzungen, die wir Enterotypen nannten, zeichnet sich durch das besonders häufige Auftreten einer bestimmten Bakteriengruppe aus. Genau genommen scheinen es regelrechte Bakteriengemeinschaften zu sein, die gut miteinander zusammenarbeiten können *(Nature 473, S. 174, 2011)*. Dafür spricht, dass wir sehr viele bakterielle Signalmoleküle in den Stuhlproben finden, die auf einen regen Informationsaustausch schließen lassen.

Obwohl Alter, Herkunftsland, Geschlecht oder Gewicht keine entscheidende Rolle bei der Gruppierung spielen, konnten wir für jedes dieser Attribute bakterielle Gene oder Stoffwechselwege finden, die damit korrelieren. Es gibt beispielsweise Gene, die mit steigendem Alter kontinuierlich zunehmen – man kann also das ungefähre Alter eines Menschen an der Menge bestimmter bakterieller Gene oder Stoffwechselketten in einer Stuhlprobe bestimmen. In der Praxis ist das zwar ziemlich sinnlos, da man sein Alter normalerweise kennt. Es zeigt aber, dass das bakterielle Erbmaterial in Stuhlproben wichtige Hinweise auf komplexe menschliche Eigenschaften liefert und sich wohl auch bei Erkrankungen einsetzen lässt: zur Diagnose etwa und vielleicht auch zur Prognose des Krankheitsverlaufs.

Schon heute weiß man, dass bestimmte Darmkrankheiten, aber auch Fettleibigkeit mit veränderter Darmflora einhergehen. Noch ist nicht bekannt, was dabei Ursache und was Wirkung ist, aber die Enterotypen könnten hier weiterhelfen. Wir haben beispielsweise festgestellt, dass einer davon sehr effektiv im Abbau von Kohlenhydraten zu sein scheint. Bei gleicher Ernährung werden dem Körper bei diesem Typ also vermutlich mehr verwertbare Nährstoffe zur Verfügung gestellt als bei den anderen – eine mögliche Ursache für Fettleibigkeit. Abhilfe könnte entsprechend eine kohlenhydratreduzierte Diät bringen.

Um solche und andere Vermutungen zu beweisen, braucht man allerdings noch viel mehr Daten, das heißt viel mehr Analysen von Stuhlproben aus breiten Bevölkerungsgruppen. Leider kostet eine einzige solche Analyse heute noch fast 1000 Euro. Um schneller an die notwendigen Daten zu kommen, führen wir deshalb zurzeit eine wissenschaftliche Studie durch, bei der jeder auf freiwilliger Basis seine Darmflora untersuchen lassen kann – allerdings auf eigene Kosten (http://my.microbes.eu). Dort kann sich ein Teilnehmer auch mit anderen Probanden mit ähnlicher Darmflora und eventuell ähnlichen Beschwerden oder Ängsten (zum Beispiel vor Fettleibigkeit) über Gegenmaßnahmen wie Medikamente oder Ernährungstipps austauschen: eine Art Facebook mit wissenschaftlichem Hintergrund.

Peer Bork ist promovierter Biochemiker und leitet eine Arbeitsgruppe am EMBL in Heidelberg.

Damit aus Neugier Wissen wird

Spektrum neo 1/2011

»***UNSER UNIVERSUM***«

Für alle Wissbegierigen zwischen 10 und 14 Jahren, die nicht nur das »Was«, sondern auch das »Wie« und »Warum« interessiert, gibt es jetzt ***Spektrum neo***: in jeder Ausgabe ein großes Thema – beginnend mit Heft Nr. 1 »Unser Universum«.

In Zusammenarbeit mit dem Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik in Kiel

www.spektrum-neo.de

facebook

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
Slevogtstraße 3–5 · 69126 Heidelberg · leserservice@spektrum.com · Tel.: 06221 9126-743 Fax: 06221 9126-751

Spektrum DER WISSENSCHAFT
WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

NANOTECHNOLOGIE

Der kleinste Elektromotor der Welt

Bisher nutzen Maschinen aus der Nanowelt Licht oder chemische Reaktionen als Antrieb. Nun haben US-Chemiker erstmals einen Elektromotor aus nur einem Molekül konstruiert. Theoretisch könnten sogar zwei Atome genügen.

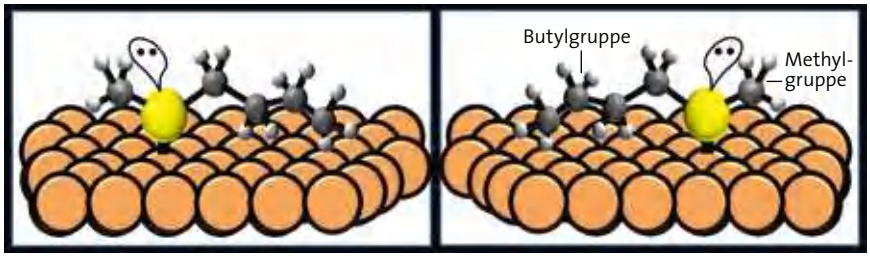
VON JOACHIM EIDING

Schon 2005 maß der damals kleinste Elektromotor der Welt nur 200 Nanometer, was einem Dreihundertstel der Dicke eines Haares entspricht. Dennoch erscheint er gegenüber dem neuesten Modell riesig: Das Team um den Chemiker E. Charles H. Sykes von der Tufts University in Medford (Massachusetts) stellte jetzt einen Motor vor, der gerade einmal einen Nanometer groß ist und aus einem einzigen Molekül besteht *(Nature Nanotechnology 6, S. 625, 2011)*. Anders als seine Konkurrenten aus der Zwergenklasse, die mit Licht oder chemischen Reaktionen angetrieben werden, funktioniert er allein mit elektrischer Energie.

Im Detail besteht der neue Minimotor aus einem gebogenen Thioethermolekül, das auf einer Kupferoberfläche sitzt. Dabei hängen zwei verschieden lange Kohlenwasserstoffketten (eine Butyl- und eine Methylgruppe), die entfernt an Ärmchen erinnern, in einem Winkel von etwas mehr als 100 Grad an einem zentralen Schwefelatom. Dieses ist frei drehbar mit einem Kupferatom der Unterlage verknüpft, wobei es die beiden Elektronen für die Bindung ganz allein beisteuert – eine Großzügigkeit, die ihm mit seinen zwei freien Elektronenpaaren nicht schwerfällt.

Durch die Verankerung auf der Kupferschicht wird das Schwefelatom zu einem »chiralen Zentrum«: Je nachdem, mit welchem seiner freien Elektronenpaare es an die Unterlage andockt, entstehen zwei zueinander spiegelbildliche Gebilde (Bild oben). Chemiker sprechen von Enantiomeren und unterscheiden sie mit den Buchstaben »R« und »S«.

Um den Nanomotor beobachten zu können, brachten ihn Sykes und seine Kollegen in einem Rastertunnelmikroskop unter. Über dessen hauchdünne Metallspitze leiteten sie Strom von fünf Pikoampere durch das Thioethermolekül zur Kupferunterlage. Dabei übertrug sich ein Teil der elektrischen Energie auf die Bindungen zwischen den Kohlenstoff- und Wasserstoffatomen der Ärmchen und versetzte sie in Schwingung. Aus diesen Vibrationen entwickelte sich durch so genannte Relaxation binnen Kurzem eine Drehbewegung: Der Nanopropeller begann zu rotieren und erreichte dabei eine durchschnittliche Geschwindigkeit von 50 Umdrehungen pro Sekunde.



E. CHARLES H. SYKES, TUFTS UNIVERSITY

Im neuen, elektrisch betriebenen Nanomotor ist ein Schwefelatom (gelb), an dem eine Butyl- und eine Methylgruppe hängen, frei drehbar auf einer Kupferoberfläche (orange) verankert. Dabei gibt es zwei unterschiedliche Anordnungen, die sich wie Bild und Spiegelbild verhalten. Diese »Chiralität« des Motors ist entscheidend für seine Funktion. Die Schlinge mit zwei Punkten symbolisiert ein freies Elektronenpaar.

Ständiges Hin und Her

Das war zu schnell, um direkt beobachtbar zu sein. Dennoch konnten die Wissenschaftler die Rotation indirekt verfolgen, indem sie den Tunnelstrom, der von der Metallspitze zum Kupfer floss, in Abhängigkeit von der Zeit maßen. Wegen der hexagonalen Symmetrie der Unterlage bestand die Drehung des gewinkelten Thioethers aus einem Hüpfen zwischen sechs verschiedenen Orientierungen, die sich jeweils um einen Winkel von 60 Grad unterschieden.

Welche davon das Molekül gerade einnahm, konnten Sykes und sein Team anhand des Tunnelstroms ermitteln. Da sie die Mikroskopspitze nicht direkt über dem Schwefelatom platziert hatten, sondern etwas seitlich, variierte dieser Strom mit der Ausrichtung der Ärmchen (Bild rechts oben). Auf diese Weise erfuhren die Forscher, welche Positionen der Rotor nacheinander einnahm.

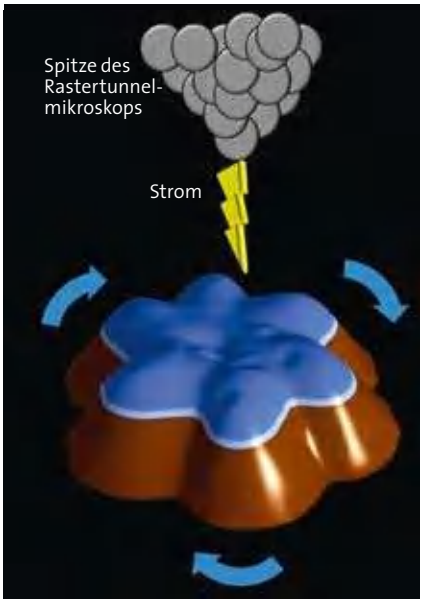
Das Ergebnis war freilich keineswegs so eindeutig wie erhofft. Anders als bei einem Flugzeug hatte der Nanopropeller nämlich nicht durchweg denselben Drehsinn, sondern rotierte mal in die eine und mal in die andere Richtung. Immerhin geschah das beim S-Enantiomer nicht gleich häufig: Im Mittel trat die Drehung im Uhrzeigersinn um fünf Prozent öfter auf als die entgegengesetz-

Wird im Rastertunnelmikroskop elektrischer Strom von einer Metallspitze durch den molekularen Nanomotor geleitet, dreht er sich. Dabei wechselt er zwischen sechs möglichen Orientierungen, die durch die hexagonale Symmetrie der Kupferoberfläche vorgegeben sind.

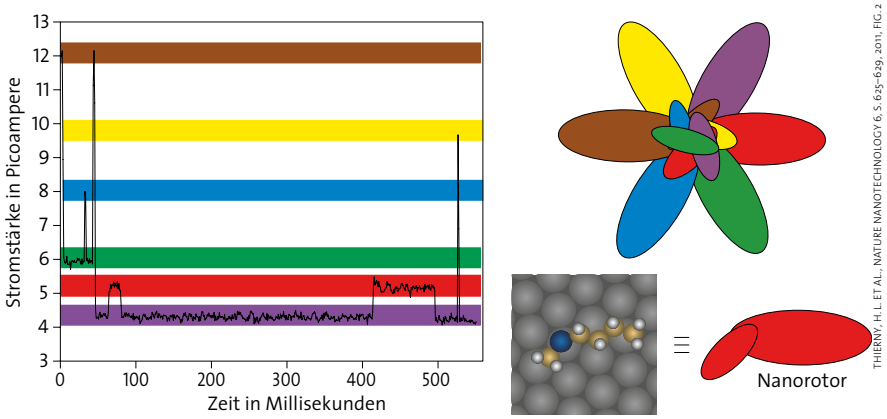
te Rotation. Bei der R-Form überwog dagegen keine der beiden Richtungen. Als die Chemiker die Metallspitze des Mikroskops gegen eine andere austauschten, verhielt es sich plötzlich genau umgekehrt: Nun rotierte das R-Enantiomer bevorzugt in eine Richtung, sein Spiegelbild dagegen nicht. Mit einigen Spitzen ließ sich überhaupt keine Asymmetrie beim Drehsinn beobachten.

Was war der Grund für dieses unterschiedliche Verhalten? Das Rätsel löste sich, als die Forscher die Metallspitzen genauestens untersuchten. Obwohl manche die Form einer idealen Pyramide hatten, waren andere etwas schief und ungleichmäßig. Dadurch stimmten sie nicht mit ihrem Spiegelbild überein, so dass es sich gleichfalls um chirale Gebilde handelte. Näherte sich eine solche Spitze nun dem chiralen Schwefelatom, entstanden zwei unterschiedliche Konstellationen mit voneinander abweichenden physikalischen Eigenschaften – je nachdem, ob es sich um die R- oder S-Form des Motors handelte. Wie ein Mensch ein Paar aus linkem und rechtem Handschuh anziehen kann, zwei linke dagegen nicht, reagierten die beiden Paarungen aus Spitze und R- oder S-Enantiomer jeweils anders auf den elektrischen Strom: Nur eine bevorzugte einen bestimmten Drehsinn.

Bei geeignet geformter Spitze rotiert der neue Nanomotor im zeitlichen Mittel also zwar in eine Richtung, aber sehr



E. CHARLES H. SYKES, TUFTS UNIVERSITY



Welche der sechs hier farblich unterschiedenen Orientierungen des Nanorotors zu einem bestimmten Zeitpunkt vorliegt, lässt sich daran erkennen, wie viel Strom durch die Anordnung fließt. Durch Messung der Stromstärke in Abhängigkeit von der Zeit war es also möglich, die Drehung des Moleküls zu verfolgen.

ungleichmäßig mit einem ständigen Hin und Her. Hinzu kommt ein weiterer Nachteil: Der Rotor arbeitet nur bei extrem frostigen minus 268 Grad Celsius (fünf Kelvin) – reichlich unbequeme Betriebsbedingungen. Bei höheren Temperaturen versetzt ihn die thermische Energie der Umgebung in schnelle, unkontrollierte Drehungen. Dies schränkt seinen möglichen praktischen Einsatz im Moment noch stark ein.

Pumpe oder Sensor

Die Forscher sind jedoch zuversichtlich, das Temperaturproblem lösen zu können. Ihr molekularer Rotor könnte nach Einschätzung von Sykes dann trotz seiner ungleichmäßigen Bewegung beispielsweise dazu dienen, in Minidiagnose- oder Analysegeräten Flüssigkeiten durch winzige Röhrchen zu pumpen, durch die sie wegen der enormen Reibung bei solch kleinen Abmessungen nur schlecht strömen. Aber auch den umgekehrten Fall hält der Chemiker für denkbar: dass sich molekulare Bewegungen durch einen elektrischen Strom verraten. Dies würde etwa Sensoren im Nanomaßstab ermöglichen.

Schon vor zwei Jahren hatten Forscher um Peter Hänggi von der Universität Augsburg einen Elektromotor konzipiert, der mit nur zwei ultrakalten Atomen auskommt und damit noch einmal deutlich kleiner ist als die Konstruktion der Gruppe um Sykes *(Physical Review Letters 102, 230601, 2009)*. Er gehorcht vollständig den Gesetzen der Quantenmechanik. Zunächst werden die beiden Atome in einem Ring aus Laserstrahlung gefangen. Das eine ist elektrisch neutral und startet den Motor, wenn es mit dem anderen Teilchen zusammenstößt und es dabei anschubst. Das geladene zweite Atom rotiert daraufhin im Ring, angetrieben von einem oszillierenden äußeren elektrischen Feld.

»Entscheidend ist, dem Motoratom beim Kickstart eine bestimmte Richtung vorzugeben«, erklärt Hänggi. Außerdem darf es im Ring nicht irgendwann kehrtmachen. Um das zu erreichen, müssen die äußeren elektrodynamischen Kräfte präzise in einer ganz bestimmten Weise eingestellt werden.

Bisher existiert dieser Elektromotor freilich nur auf dem Papier. Ob er sich je realisieren lässt, ist völlig offen. Bei der Umsetzung könnten etwa Photonen stören, die von den beteiligten Atomen absorbiert oder emittiert werden. Sergej Flach vom Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme glaubt außerdem, der Nanomotor sei nur dann effektiv, wenn mehrere Exemplare miteinander gekoppelt würden. Den Nanokonstrukteuren bleibt also noch viel Tüftelei, bis sie mit praxistauglichen Modellen aufwarten können.

Joachim Eiding ist promovierter Chemiker und freier Wissenschaftsjournalist in München.

Autismus: Neue genetische Fährten

Mutationen an vielen verschiedenen Stellen im menschlichen Genom können zu Autismus beitragen. Neue Studien zeigen, dass Betroffene nicht selten eine ungewöhnliche Kopienzahl von Genen oder größeren DNA-Abschnitten aufweisen. Oft tritt die Veränderung sogar völlig neu auf.

VON MICHAEL GROSS

Autismus hat meist genetische Ursachen, wie Untersuchungen an Familien mit betroffenen Kindern und Zwillingsstudien an den Tag brachten. Das gilt ebenfalls für die anderen Störungen des autistischen Spektrums wie etwa das Asperger-Syndrom. Doch welche Gene genau mit Autismus zusammenhängen, in welcher Weise sie verändert sind und welche Auswirkungen das genau hat, ist weniger klar. Forscher haben zwar schon mehr als 80 verdächtige Erbanlagen entdeckt, eindeutige Beziehungen fanden sie bisher allerdings nur in den vergleichsweise wenigen Fällen, in denen die Krankheit zusammen mit einer anderen genetisch bedingten Störung einhergeht. Dazu zählt etwa das Fragile-X-Syndrom, bei dem ein Gen auf dem X-Chromosom mutiert ist. Betroffene sind oft geistig behindert, und manche von ihnen werden autistisch.

Nachdem Forscher um die Jahrtausendwende das menschliche Genom entziffert hatten, konzentrierten sie sich zunächst darauf, Mutationen einzelner Nukleotide (»Buchstaben«) des Erbmaterials zu katalogisieren. Anhand solcher so genannter SNPs (Einzelnukleotidpolymorphismen, englisch: *single nucleotide polymorphisms*) wollten sie die genetischen Ursachen von häufigen und komplexen Krankheiten wie Krebs oder eben auch von Entwicklungsstörungen wie Autismus aufspüren.

Doch die Hoffnung trog (siehe »Die vertagte Revolution«, SdW 2/2011, S. 34). Offenbar gehen nur wenige – und dann oft auch noch seltene – Krankheiten auf einzelne mutierte Nukleotide zurück. Ihre Hintergründe waren zudem meist bereits bekannt, wie etwa bei der Mukoviszidose.

Seit nun immer mehr Genome einzelner Personen sequenziert werden, zeigte sich, dass SNPs einen kleineren Teil der genetischen Vielfalt der Menschen ausmachen als erwartet. Denn zum Beispiel kommen auch so genannte Indels (Insertionen und Deletionen) oft vor, bei denen DNA-Abschnitte zusätzlich eingefügt sind beziehungsweise fehlen. Des Weiteren gibt es in den DNA-Strängen gleiche, sich wiederholende Bereiche, die auch ganze Gene betreffen können. Die Anzahl dieser Kopien schwankt von Mensch zu Mensch, da ein bestimmter Abschnitt verdoppelt worden oder verloren gegangen sein kann.

Wie oft kommt ein bestimmter DNA-Abschnitt im Erbgut vor?

Solche Kopienzahlvariationen treten nach genetischen Maßstäben vergleichsweise häufig auf: Schätzungsweise 0,4 Prozent der Genomsequenzen von zwei nicht miteinander verwandten Menschen unterscheiden sich in diesem Punkt. Viele solcher Mutationen sind verbreitet, allerdings in der Regel harmlos. Doch inzwischen kennen Mediziner auch einige Ausnahmen. So fanden sich in den letzten Jahren Indizien dafür, dass bei Krebs veränderte Kopienzahlen eine Rolle spielen.

Seit einiger Zeit besteht nun auch für autistische Störungen ein entsprechender Verdacht. Hinweise darauf lieferten mehrere wissenschaftliche Untersuchungen seit 2007. Besonders die groß angelegte Studie eines internationalen Konsortiums erbrachte recht überzeugende Daten *(Nature 466, S. 368, 2010)*. Hierbei gingen genetische Befunde von fast 1000 Personen mit einer Diagnose aus dem autistischen Spektrum ein. Bei diesen Menschen waren deutlich mehr sonst seltene Variationen von Kopienzahlen erkennbar als bei gesunden Vergleichspersonen. Einige der Abweichungen betrafen Gene, die bereits zuvor mit Autismus in Verbindung gebracht wurden. Andere häuften sich hingegen in bisher unverdächtigen Regionen des Erbguts.

Drei im Juni 2011 veröffentlichte wissenschaftliche Studien großer amerikanischer Forscherteams ergänzen nun das Bild mit neuen Befunden und tasten sich näher an die Zusammenhänge heran *(Neuron 70, S. 863, S. 886 und S. 898, 2011)*. Zwei der Gruppen durchforsteten mit unterschiedlichen Verfahren denselben Satz Genome von fast 1000 Menschen mit einer autistischen Erkrankung sowie das Erbgut ihrer Familienangehörigen, wobei nur diese eine Person in der Familie krank war. Dabei entdeckten sie bei zusammengenommen bis zu acht Prozent der Patienten in unterschiedlichen Bereichen des Erbguts neu aufgetretene Kopienzahlvariationen, die bei den Eltern und Geschwistern nicht vorkamen – eine bemerkenswert große Anzahl.

Meistens traten die einzelnen Varianten allerdings nur bei ganz wenigen Kranken auf. Lediglich ein Abschnitt auf dem Chromosom 16 (als 16p11.2 bezeichnet) war bei mehr als einem Prozent der untersuchten autistischen Personen betroffen. Dass Mutationen dort bei Autismus vorkommen, hatten auch frühere Studien bereits aufgezeigt. Dieser Abschnitt dürfte damit einen viel versprechenden Ansatzpunkt für eingehendere Untersuchungen darstellen, um dem Rätsel der Störung näher zu kommen, zumal sich hierfür relativ leicht Probanden in hinreichender Zahl finden lassen.

Doktoranden
und PostDocs!

Könnt ihr reden und schreiben?

Befasst ihr euch mit dem Thema Umwelt?

Dann macht mit beim Wettbewerb »Wissenschaft verstehen«!

Wir wollen wissen, woran ihr forscht. Erklärt uns eure Arbeit so, dass wir sie verstehen. Begeistert uns!

Einsendeschluss ist der 31. Mai 2012.
Mehr Infos findet ihr unter

www.ufz.de/wissenschaft-verstehen

Gehört ihr mit euren schriftlichen Beiträgen zu den sechs Besten, dann steht ihr am 4. Dezember 2012 in Leipzig im Finale. Dort könnt ihr das Publikum mit eurem Vortrag faszinieren.

Die Teilnahme lohnt sich. Es winken nicht nur Geldpreise im Gesamtwert von 8 000 €. Ihr habt auch die Chance, euren Wettbewerbsbeitrag in **Spektrum der Wissenschaft** zu veröffentlichen.

WISSENSCHAFT VERSTEHEN

Ein Wettbewerb von

HELMHOLTZ ZENTRUM FÜR UMWELTFORSCHUNG UFZ

Spektrum DER WISSENSCHAFT VERLAG

Unterstützt von

Sparkasse Leipzig

MITGAS MITTELDEUTSCHE GASVERSORGUNG GMBH

BMU BAUER UMWELT

Leipziger Stiftung für Innovation und Technologietransfer

Agilent Technologies

Wir arrangieren uns mit dem Klimawandel

Doch damit gehen die Probleme erst richtig los.

Die Weltklimagipfel Kioto 1997, Kopenhagen 2009 und Durban 2011 markieren eine absteigende Linie. Lag in Kioto eine völkerrechtlich verbindliche Selbstverpflichtung der Industrieländer zur Senkung ihrer Treibhausgasemissionen noch zum Greifen nah, so rückte sie mit jeder Folgekonferenz in immer weitere Ferne. Wenn die Fortschreibung des Kioto-Protokolls scheitert, steht es ab 2012 jedem einzelnen Land frei, ob und inwieweit es etwas gegen die globale Erwärmung unternimmt.

Dabei hat sich das Problem in den vergangenen zehn Jahren nicht etwa von selbst erledigt oder auch nur abgemildert, im Gegenteil. Noch nie haben Industrie- und Schwellenländer so viel Kohlendioxid in die Luft geblasen wie heute, und der globale Trend weist steil nach oben. Vor allem Indien und China legen rapide zu; die USA bauen ihre führende Position bei der Pro-Kopf-Emission weiter aus. Zugleich erhärtet sich der – von den meisten Klimaforschern ohnedies nicht bezweifelte – Zusammenhang zwischen CO_2-Ausstoß und Erderwärmung.

Ein kanadisch-chilenisches Forscherteam um Christian M. Zdanowicz und Christophe Kinnard hat kürzlich akribisch die Veränderungen des arktischen Eisschilds in den vergangenen 1450 Jahren rekonstruiert und festgestellt: Noch nie ist die Temperatur von Luft und Meerwasser stärker gestiegen als im 20. Jahrhundert, noch nie hat die Eisfläche der Arktis so stark abgenommen wie jetzt *(Nature 479, S. 509, 2011)*.

Klimaskeptiker werden natürlich bestreiten, dass das etwas mit anthropogenen Treibhausgasen zu tun hat; schuld seien vielmehr kosmische Strahlen, Sonnenflecken oder andere – buchstäblich weit hergeholte – natürliche Ursachen. Vor allem in den USA ist diese Auffassung stark verbreitet und beeinflusst dort die Politik.

Doch die aktuelle Erderwärmung ist inzwischen eine Tatsache, die auch dann zum Handeln zwingt, wenn die Staaten nicht willens oder fähig sind, gemeinsam gegen die Ursachen vorzugehen. Klimaforscher haben bisher anhand von Weltmodellen vor allem Szenarien für das Erdklima entworfen und globales Handeln angemahnt. Bald werden sie als Ratgeber gefragt sein, wenn es gilt, die lokalen Folgen zu meistern.

Wie muss eine Kanalisation ausgelegt werden, die noch in 50 Jahren Unwetter und Regengüsse von vielleicht nie da gewesener Heftigkeit bewältigen soll? Wie plant ein afrikanischer Bauer ein Bewässerungssystem, das einerseits plötzliche Wolkenbrüche aushält, andererseits aber auch Wasser für Zeiten der Dürre speichert? Auf solche konkreten Fragen sind die Wissenschaftler offenbar schlecht vorbereitet, wie eine Konferenz des World Climate Research Program zeigte, die im Herbst 2011 in Denver (Colorado) stattfand *(Science 334, S. 1052, 2011)*.

Gebraucht wird eine praxisorientierte Klimaforschung – ein »Klimadienst«, an den sich Nutzer wenden können, um direkt anwendbare Informationen zu erhalten. Dazu bedarf es lokaler Klimamodelle; doch deren Prognosen sind einstweilen noch unsicherer als die Globalszenarien. So wollten die Wasserwerke von Denver wissen, welche Zuflüsse aus den nahe gelegenen Bergen sie in kommenden Jahrzehnten zu erwarten hätten. Die beauftragten Forscher rechneten 16 unterschiedliche Globalmodelle auf die lokalen Verhältnisse herunter. Obwohl durchweg höhere Temperaturen herauskamen, waren die Niederschlagsprognosen völlig widersprüchlich; sowohl Wasser im Überfluss als auch Trockenheit lagen im Bereich des Möglichen.

Michael Springer

Eine Klimaforschung mit lokaler Aussagekraft tut also not. Doch sie steht erst ganz am Anfang. Dabei ist die Herausforderung gewaltig: Örtliche Prognosen sind noch viel anspruchsvoller als die globalen Weltmodelle.

Große Hoffnungen setzen die beiden Teams auch auf den Abschnitt 7q11.23, der bei mehreren Probanden verdoppelt war. Denn eben jenes DNA-Stück fehlt bei Menschen mit Williams-Beuren-Syndrom. Diese Behinderung geht unter anderem mit übertrieben ausgeprägtem Sozialverhalten einher – also gerade das Gegenteil von Autismus. Möglicherweise führt der spiegelbildliche genetische Befund Forscher zu den molekularen Mechanismen hinter den psychischen Auffälligkeiten der beiden Entwicklungsstörungen.

Auch die dritte der Publikationen befasst sich mit seltenen Kopienzahlvarianten, die bei manchen Autisten vorkommen. Diese Forscher erstellten umfangreiche Funktionsnetzwerke für die von solchen Mutationen eventuell betroffenen Gene, untersuchten also deren Wirkungen auf den Organismus im größeren physiologischen Zusammenhang. Demzufolge scheint eine Störung der Ausbildung der Synapsen – der Kontaktstellen, über die Nervenzellen Signale übermitteln – bei der Entwicklung von Autismus eine Schlüsselrolle zu spielen.

Niemand weiß bisher, warum Jungen viermal so oft an Autismus leiden wie Mädchen. Mit dieser Frage setzen sich alle drei Arbeiten auseinander, können das Phänomen aber auch nicht erklären. Einige der Forscher vermuten, dass Mädchen generell widerstandsfähiger gegenüber solchen genetischen Defekten sind. Denn tendenziell scheinen bei ihnen mehr ungewöhnliche Kopien vorliegen zu müssen als bei Jungen, ehe sie erkranken.

Wie viele Erbfaktoren letztlich zu einem autistischen Syndrom beitragen können, ist noch völlig unklar – die Schätzungen reichen von 130 bis zu 400 Genen. Ein begleitender Kommentar zu den neuen Studien *(Neuron 70, S. 806, 2011)* betont deswegen, dass zukünftige Therapieansätze auf Kenntnisse der vielen verschlungenen Signalwege in den Zellen zurückgreifen müssen.

Michael Groß ist Biochemiker und freier Wissenschaftsjournalist in Oxford, England.

Tödliche Falle für Dinosaurier

Ein spektakulärer Fossilfund in der Wüste Gobi zeugt von einem prähistorischen Unglück – und erlaubt Paläontologen ungeahnte Einblicke in das Zusammenleben junger Dinosaurier.

Von Paul C. Sereno

Das Szenario am Ufer eines vorzeitlichen Sees: Mindestens 26 Exemplare eines straußenähnlichen Sauriers kamen hier gemeinsam zu Tode.

Ein Fundort wie dieser war mir in vielen Jahren als Dinosaurierfeldforscher noch nicht begegnet. Erst 15 Tage waren wir mitten in der Wüste Gobi in der Inneren Mongolei auf Fossilsuche. Und nun waren wir anscheinend dabei, gleich einen ganzen Friedhof mit ziemlich intakten Dinosaurierüberresten auszugraben.

Ein paar Wochen später hatten wir an dieser Stelle Knochen von reichlich einem Dutzend Tieren frei gelegt. Dazu benutzten wir neben dem üblichen Werkzeug wie Hacke, Pickel und Grabstichel zeitweise auch schweres Gerät, nämlich Bulldozer, die den Boden über den vielen Fossilien schichtweise abtrugen. Wunderbarerweise gehören alle hier lagernden Skelette zu ein und derselben Saurierart, einem äußerlich an Strauße erinnernden Reptil, das inzwischen – auch dank dieses Massengrabs – zu den bekanntesten Dinosauriern zählt: *Sinornithomimus dongi*.

Begeistert sind wir von der Stätte inzwischen noch aus anderen Gründen: Die Fossilien und Umgebungsspuren lassen erkennen, wie die Tiere vor 90 Millionen Jahren vermutlich verendeten. Ja, sie erlauben sogar Schlüsse auf ihr soziales Verhalten und Gruppenleben. Bis heute durfte ich nie wieder einen so reichen Fund einer einzelnen Dinosaurierspezies miterleben.

Frühe Dinosaurierentdeckungen in der Wüste Gobi sind mit zwei großen Forschern verbunden. Amerikaner denken sofort an den Paläontologen Roy Chapman Andrews (1884–1960), den unerschrockenen Expeditionsleiter und späteren Direktor des American Museum of Natural History in New York. In den 1920er Jahren bereiste er die Wüstengebiete Innerasiens, auch Teile der heutigen Mongolei. Er fand dort, in der Äußeren Mongolei, erstmals Dinosauriereier – damals als Sensation gefeiert. Zur Ausbeute dieser Fahrten gehörte auch der am Hinterfuß sichelkrallenbe-

JAMES GURNEY

AUF EINEN BLICK

JUGENDHORDE IN DER FALLE

1 In der Wüste Gobi in der chinesischen **Inneren Mongolei** entdeckten Forscher ein **90 Millionen Jahre altes Massengrab** mit den hervorragend erhaltenen fossilen Skeletten von mehr als zwei Dutzend straußenähnlichen Dinosauriern der Art ***Sinornithomimus dongi***.

2 Die Tiere müssen alle **gleichzeitig umgekommen** sein. Offenbar blieben sie im weichen Grund am Ufer eines Sees stecken und konnten sich nicht wieder befreien. Dann machten sich Raubtiere über sie her.

3 Alle Skelette gehörten zu **Jungtieren** verschiedenen Alters. Möglicherweise zogen diese Saurier **in eigenen Gruppen** umher, bis sie erwachsen wurden.

wehrte, zweibeinige *Velociraptor*, heute vielen aus dem Film »Jurassic Park« bekannt.

Europäern ist eher der Name des Topografen und Geografen Sven Hedin (1865–1952) vertraut. Der schwedische Entdeckungsreisende und Asienforscher erkundete die Gobi und andere Gebiete Chinas zwischen 1927 und 1935 auf der internationalen chinesisch-schwedischen Expedition, die er leitete. Aus der heute chinesischen südlichen Gobi – die zu der autonomen chinesischen Inneren Mongolei gehört – brachte er einzigartige Fossilien von Dinosauriern mit.

Sauriersuche an der Seidenstraße

In späteren Jahren entdeckten Paläontologen zwar auch in China auf Hedins Spuren versteinerte Dinosauriernester mitsamt Eiern und brütenden Elterntieren sowie Raptorenfossilien – und beides von ebenso hervorragender Qualität, wie man sie mittlerweile aus der Mongolei kennt. Die meiste Aufmerksamkeit gilt jedoch inzwischen dem Norden dieser Region. Denn seit sich der Staat Mongolei vor einem guten Jahrzehnt westlichen Besuchern öffnete, haben wissenschaftliche Expeditionen aus aller Welt seine abgelegenen Gebiete durchkämmt (SdW 2/1995, S. 68). Die südliche Gobi haben Paläontologen dagegen lange Zeit kaum besucht.

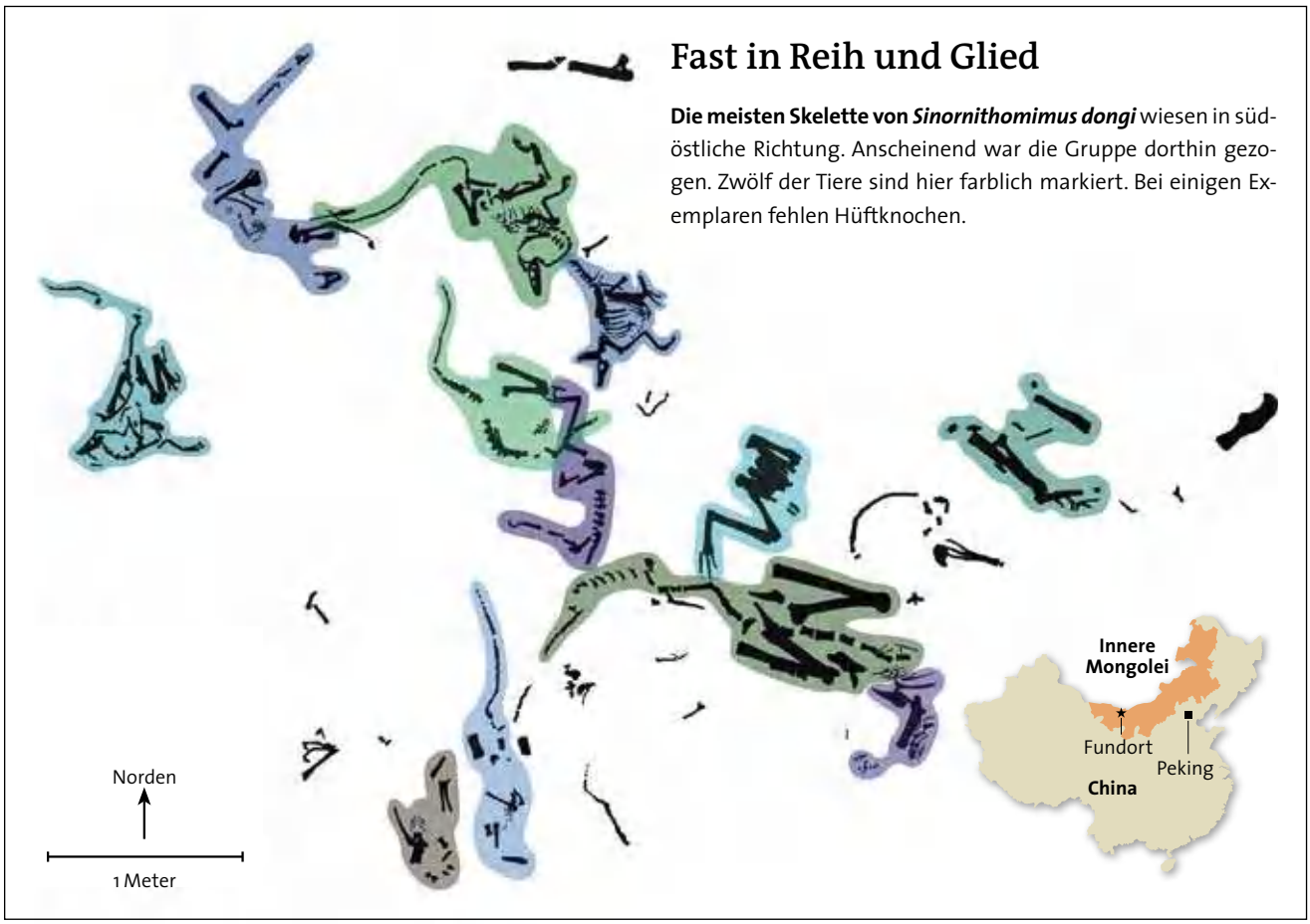
Ich selbst lernte die abgelegenen Landstriche Chinas 1984 auf einer Weltrundreise kennen. Es war das erste Jahr, in dem ausländische Touristen im Land unbeaufsichtigt herumfahren durften. Damals war ich 27 Jahre alt und Doktorand der Geologie. Eine kohlebetriebene Eisenbahn brachte mich nach Hohhot, in die Hauptstadt der Inneren Mongolei. Damals wirkte der Ort mit seinen niedrigen Gebäuden noch wie eine Kleinstadt. Immerhin gab es dort ein naturkundliches Museum. Eigentlich lockten mich aber die fossilhaltigen Felsformationen aus der Dinosaurierzeit, die sich von hier hunderte Kilometer nach Westen ziehen. Sie flankieren die ehemalige Seidenstraße, die einst die mongolische Steppe mit dem Herzen Zentralasiens verband.

Als ich nach Peking zurückkam, besuchte ich den renommierten Dinosaurierkenner und Feldforscher Zhao Xijin. Er ist Professor am dortigen Institut für Wirbeltierpaläontologie und Paläoanthropologie, gilt als einer der führenden Experten auf seinem Feld und hatte damals bereits über ein Dutzend neue Dinosaurierarten entdeckt. Wir kamen schnell überein, dass wir einmal gemeinsam eine Expedition in die Innere Mongolei unternehmen würden. Allerdings sollten 16 Jahre verstreichen, bis wir diesen Wunsch 2001 endlich verwirklichen konnten.

Um die Unternehmung vorzubereiten, fuhr ich 2000 wieder nach Hohhot, diesmal zusammen mit Zhao. Am Bahnhof empfing uns der Direktor des dortigen Long-Hao-Instituts für Stratigrafische Paläontologie, der damals 60-jährige Geologe Tan Lin. In seiner energiegeladenen Art unterbreitete er uns, welche Maßnahmen für eine Expedition in die Gobi im kommenden Frühjahr zu treffen seien und wie die benötigte Ausrüstung besorgt werden könnte. Das Städtchen hatte sich

MIKE HETTWER

Dank des Bulldozers von einem nahen Militärstützpunkt, der das Fossillager frei legen half, wurden die Ausgrabungen in wenigen Wochen abgeschlossen.



Fast in Reih und Glied

Die meisten Skelette von *Sinornithomimus dongi* wiesen in südöstliche Richtung. Anscheinend war die Gruppe dorthin gezogen. Zwölf der Tiere sind hier farblich markiert. Bei einigen Exemplaren fehlen Hüftknochen.

SKELETTKARTE: VARRICCHIO, D.J. ET AL.: MUD-TRAPPED HERD CAPTURES EVIDENCE OF DISTINCTIVE DINOSAUR SOCIALITY. IN: ACTA PALAEONTOLOGICA POLONICA 53, S. 567–578. 2008.
FUNDORT-KARTE: XNR PRODUCTIONS CHINA

in der Zwischenzeit zu einer pulsierenden Metropole gemausert, so dass es nicht weiter schwierig sein würde, vieles, vor allem die Fahrzeuge, direkt in Hohhot aufzutreiben.

Etwas länger dauerte es, bis wir uns auf das genaue Ziel dieser Fahrt einigten. Tan Lin versprach sich viel davon, die alten Stellen nochmals zu erkunden, wo schon Hedins Experten und später andere Forscher bedeutende Fossilien geborgen hatten. Mit Sicherheit gäbe es dort noch eine Menge zu finden. Doch ich wollte lieber ein paläontologisch unberührtes Terrain aufsuchen. Nach einigem Hin und Her siegte die Verlockung des Unbekannten. Also beschlossen wir, im Frühjahr auf der Seidenstraße in die entlegenen westlichen Gebiete der Gobi vorzustoßen.

Mitte April 2001 war unsere 16-köpfige Mannschaft in Hohhot versammelt – ein Team aus Amerikanern, Franzosen, Chinesen und Mongolen. Wir verteilten uns auf vier Geländewagen und ein Lastfahrzeug, das die Vorräte und die etliche Tonnen schwere Ausrüstung transportierte. 700 Kilometer weit wollten wir entlang des gelben Flusses und dann weiter in die Wüste fahren.

Am Ziel schlugen wir unweit des kleinen militärischen Außenpostens Suhongtu unser erstes Basislager auf. Täglich zogen wir nun zur Fossiliensuche los. Zu Fuß streiften wir so manchen Kilometer durch das unwegsame, unebene Gelände, immer mit konzentriertem Blick auf den Boden und die nächste Umgebung, ob nicht irgendwo ein Stück von einem Fossil im Gestein zu sehen war. Natürlich gehört bei so einer Unternehmung auch Finderglück dazu, aber manche Leute besitzen einfach den richtigen Spürsinn.

Den ersten bedeutenden Fund machte Dave Varricchio von der Montana State University in Bozeman. Der Paläontologe entdeckte auf der Unterseite einer Felsplatte den Abdruck eines Fußes mit drei Zehen, einem langen mittleren und zwei kurzen seitlichen. Dieser Fuß war größer gewesen als eine Menschenhand, doch für einen Dinosaurier eher klein. Nach unserer ersten Einschätzung handelte es sich um die Spur eines Ornithomimiden (»Vogelnachahmers«). Jene Echsen, die in der Anmutung Straußen ähnelten, gehörten zu den Theropoden und dort in die Gruppe der Ornithomimosaurier.

Neues Tal mit reicher Ausbeute

Laut einer 25 Jahre alten chinesischen geologischen Karte sind die Gesteine im Umkreis unseres Camps rund 90 Millionen Jahre alt. Sie stammen somit aus der späten Kreidezeit, also genau passend für Dinosaurier. Trotzdem entdeckten wir in der Umgebung des Lagers außer dem Fußabdruck lediglich Knochen kleiner Arten, die man von der Gobi bereits kannte – alles keine sonderlich aufregenden Fossilien.

Deswegen fuhren wir schließlich zu einem nahe gelegenen weiten Tal, das reichere Ausbeute versprach. Und wirklich steckten unsere Leute schon bald über verschiedenen

Versteinerungen die Köpfe zusammen. An einer Stelle etwa schien der Schädel eines mutmaßlichen primitiven Entenschnabelsauriers hervorzugucken. Ein weiteres Fossil gehörte wohl zu einem kleinen Sauropoden, einem jener vierbeinigen, langhalsigen Pflanzenfresser, von denen manche Arten gigantische Ausmaße erreichten. Am interessantesten erschien jedoch eine Felswand aus Lagen roten und blauen Gesteins, die wie gesprenkelt mit Beinknochen von eher kleinen Dinosauriern wirkte.

Nur war das offensichtlich kein natürlich entstandener Abhang. Vor uns schienen hier schon andere nach Fossilien gegraben und dabei den Fels abgetragen zu haben. Von wegen unberührtes Gelände! Tan erzählte uns, dass ein Geologe und Studienkollege die Stelle 1978 beim Kartieren der Gegend entdeckt hatte. Tatsächlich zeigte die Karte dort ein winziges Knochensymbol. Tan selbst hatte dann 1997 eine chinesisch-japanisch-mongolische Expedition hierher geführt. Es gelang der Gruppe auch, ein gutes Dutzend Skelette eines kleinen, bis dahin unbekannten Dinosauriers zu bergen, doch schließlich musste man die Unternehmung abbrechen, ohne alle Fossilien ausgegraben zu haben, weil die Zeit nicht reichte und die Materialien ausgingen.

In meinem Rucksack hatte ich eine wissenschaftliche Arbeit von 1999 über einen neuen Ornithomimiden aus der Gobi. Autor war der japanische Paläontologe Yoshitsugu Kobayashi, der damals an der Southern Methodist University in Dallas (Texas) promovierte. Jetzt erst wurde mir klar, dass die von Kobayashi beschriebenen Fossilien von genau dieser Felswand stammten. In der Arbeit erwähnen er und seine Mitautoren sowohl die Mengen an versteinerten Knochen als auch deren exzellenten Zustand. Bei manchen Skeletten fanden die Forscher sogar noch Magensteine, denn wie heutige Alligatoren, Robben und viele Vögel verschluckten einige Dinosaurier wohl kleine Steine, die im Magen vermutlich halfen, die Nahrung zu zermahlen. Kobayashi nannte die neue Art 2003 *Sinornithomimus dongi*.

Warum aber gab es gerade an dieser einen Stelle dicht beieinander dermaßen viele Fossilien von derselben Saurierart? Wir fragten uns, ob diese Tiere wohl alle gleichzeitig umgekommen waren.

Indizien der Todesumstände konservieren

In den folgenden Wochen fuhren wir jeden Tag zu dem fossilienreichen Tal. Wir wollten unbedingt herausfinden, warum in der aufgebrochenen Wand so viele Ornithomimiden steckten. Als wir uns weiter in den Fels vorarbeiteten, fanden wir nur immer mehr Skelette. Währenddessen erforschten einige Teammitglieder die Stirnseite der Erhebung und nahmen von dort Gesteinsproben, um die geologische Situation dieses Massengrabs zu analysieren.

Wollen wir herausfinden, unter welchen Umständen die Tiere zu Tode kamen, deren Fossilien wir aufspüren, müssen wir bei den Grabungen höchst umsichtig vorgehen. Auf keinen Fall darf man einfach nur die Knochen oder Skelette herausholen. Vielmehr sollte man die gesamte Fundsituation genauestens mit erfassen. Umso mehr gilt das bei dem Verdacht, dass mehrere Vertreter derselben Art gleichzeitig starben und vielleicht sogar eine Gruppe bildeten. Denn natürlich können solche Skelettansammlungen auch einfach daher rühren, dass immer wieder einzelne Tiere am selben Gewässer versanken oder dass eine Überschwemmung die Kadaver nur zusammentrug.

Falls es sich dagegen tatsächlich um eine Herde handelte, die hier starb, lassen sich dafür mit etwas Glück und dem richtigen Spürsinn durchaus auch heute noch Indizien finden. Aufschlussreich für die Todesursache könnte die Position und Anordnung der Tiere und ihre Ausrichtung zueinander sein. Ebenso mögen Spuren von Raubtierzähnen oder gesplitterte Knochen von den näheren Umständen erzählen. Paläontologen bewerten und vergleichen auch die Beschaffenheit der Sedimente, die sich vorher, im Zeitraum des Todes und später ablagerten.

Schon bald waren wir uns ziemlich sicher, dass das Schicksal all diese straußenähnlichen Dinosaurier gleichzeitig ereilt hatte. Denn fast alle Skelette lagen ziemlich in die gleichen Richtung orientiert – und nicht wild verstreut –, als wären die Tiere zusammen irgendwohin unterwegs gewesen.

Natürlich kann so ein Muster auch zu Stande kommen, wenn eine Überflutung ihre Opfer mit sich fortreißt. Doch hier sprach nichts dafür, dass die Kadaver nachträglich vom

Szenen einer Grabung: Die Forscher prüfen den Abraum, den der Bulldozer aufwirft, auf Fossilien (oben). Der Paläontologe Dave Varricchio (links) sucht im Sieb nach kleinen Knochen, während der Autor (rechts) dem harten Gestein mit einer Spitzhacke zu Leibe rückt.

ALLE FOTOS: MIKE HETTWER

Ort des Sterbens wegbewegt worden wären. Auch die Skelette wirkten dafür zu intakt.

Nach den geologischen Analysen lag hier einst ein See, dessen Größe sich immer wieder veränderte, wenn das Klima trockener oder feuchter wurde. Die dünnen Schichten roten und blauen Gesteins besagen, dass das Gebiet damals von feinkörnigem Schlamm und Schluff bedeckt war. Außerdem fanden wir sedimentgefüllte Trockenrisse – ein Anzeichen dafür, dass breitere Uferstreifen manchmal länger trockenfielen. Einige der Saurierskelette waren von den flachen Schalen winziger Süßwasserkrebse bedeckt: von für eine solche Umwelt charakteristischen so genannten Muschelschalern (Conchostraca). Demnach lagen manche der Tiere wohl eine Zeit lang im Uferbereich des Sees. Zudem wirkten die Schlammablagerungen nahe bei den Skeletten unberührt von grabendem Kleingetier oder dort wachsenden Pflanzen, denn sie enthielten weder Wurmbohrlöcher noch Wurzelgänge. Jene Zone wurde vermutlich regelmäßig überspült. Offenbar diente dieser See in einer sonst trockenen Gegend als Oase.

Eine Ansammlung von Skeletten einer einzigen Dinosaurierart wie an dem Ort ist bis heute einmalig. Natürlich spekulierten wir schon während der Ausgrabungen viel darüber, was hier zu Urzeiten wohl geschehen sein mochte. Hatte sich in der Nähe ein Vulkanausbruch ereignet? Oder vielleicht eine Flutkatastrophe?

Trittspuren vom Kampf um die Freiheit

Zum Grabungsteam gehörte auch die Pädagogin Gabrielle Lyon. Während sie mit einer Nadel die zusammengekrallten Zehen eines der Fossilien frei präparierte, meinte sie: »Vielleicht sind die ja nur im Schlamm versackt.« Das hielt ich für zu weit hergeholt. Gabrielle hatte zwar einige Grabungserfahrung, war aber weder Paläontologin noch Geologin. Große Tiere pflegen nicht so ohne Weiteres im Morast zu verenden. Einem einzelnen Rind kann es wohl schon einmal widerfahren, dass es bis über die Knie einsinkt und sich nicht mehr zu befreien vermag. Aber gleich einer ganzen Herde? So etwas geschieht sicherlich äußerst selten. Immerhin wusste Dave Varricchio, unser Experte für Fossilisation, dass Wildpferde manchmal auf solche Weise umkamen.

Bald gab die Fundstelle mehr aufschlussreiche Zeichen preis. Dicht bei der Schicht mit den Skeletten bemerkte Dave auf der frei gelegten Fläche v-förmige Muster, die mit der

BEIDE FOTOS: MIKE HETTWER

So sahen die Fossilien aus, als die Forscher sie aus dem Gestein frei legten. Das Foto links zeigt einen Arm und eine Hand von *Sinornithomimus dongi*. Immer wieder mussten die Forscher Sandstürmen trotzen. Oft genug konnten sie dann nur noch in ihre Zelte flüchten (rechts).

Spitze nach unten zeigten, als ob dort etwas Dünnes den Schlamm in die Tiefe gedrückt hätte. Stammten die Spuren etwa doch von den Zehen von Tieren, die im tiefen Morast um ihr Leben gestrampelt hatten?

Leider sah es inzwischen so aus, als könnten wir nicht mehr viel weiter in den Hang vorstoßen, denn der fossilhaltige Horizont senkte sich unter dem Hügel immer mehr in die Tiefe, was die Grabungen mit jedem Tag schwieriger und heikler machte. Für einen vollständigen Aufschluss dieses Fundkomplexes würden wir mit dem vorhandenen Gerät Monate, wenn nicht Jahre benötigen. Doch dann kam uns der Zufall zu Hilfe.

Neue Grabungsmethode: Grob, aber effektiv

Die Soldaten des erwähnten Militärpostens hatten uns zu einem Basketballmatch aufgefordert, und an einem freien Tag folgten wir der Einladung. Die älteren Herren Tan und Zhao schauten dem Spiel zu. Dabei bemerkten sie in der Nähe abgestellte schwere Baumaschinen. Am selben Abend schon sprachen wir darüber mit den verantwortlichen Offizieren. Etliche Runden Baijiu taten das Ihre – eines scharfen Getränks, das übersetzt harmlos »Weißwein« heißt. Und tatsächlich erschien ein paar Tage später ein riesiger Bulldozer am Grabungsort.

Nun ging es rasch voran. Die große Maschine trug von der Hügelkuppe wenige Zentimeter dicke Schichten ab, und wir marschierten jedes Mal wachen Auges hinterher. Auch oberhalb des Fundhorizonts, der uns augenblicklich am meisten interessierte, aber erst zwei Meter tiefer lag, konnten ja Fossilschätze auftauchen. »Stopp!«, schrie plötzlich der Paläontologe Jeff Wilson von der University of Michigan in Ann Arbor. Die Schaufel des Fahrzeugs hatte einen Felsblock aufgerichtet, und Wilson erspähte Zähne und Kiefer. Eifrig durchsuchten wir das rechts und links von der Fahrspur aufgeworfene Material und fanden wirklich auch noch die restlichen Stücke des 45 Zentimeter langen Schädels eines noch unbekannten Raubsauriers.

Schon am vierten Tag hatte die Maschine den Hügel bis knapp über dem angezielten Massengrab unseres Ornithomimiden abgetragen. Nun konnten wir wieder allein arbeiten. Am Ende hatten wir insgesamt 13 Skelette von dem straußenähnlichen Dinosaurier geborgen. Das bedeutete: Zusammen mit den früheren Skeletten waren hier Knochen von gut zwei Dutzend der Urzeitechsen fossilisiert. Anders, als man es sonst meist antrifft, lagen die Überreste der einzelnen von uns geborgenen Tiere aber nicht jeweils innerhalb einer wenige Zentimeter dünnen Schicht – die darüber abgelagerten Sedimente hatten sie also nicht komplett flach gepresst. Vielmehr ragten die Hinterbeine mancher Echsen viel tiefer in den damals schlammigen Untergrund. Und auffälligerweise fehlten bei ein paar sonst ziemlich vollständigen Skeletten ausgerechnet die Hüftknochen, als hätte jemand diese Tiere von oben und hinten angefallen.

Das alles zusammen mit der Orientierung der Saurier in dieselbe Richtung erweckt durchaus den Eindruck, als ob hier eine Herde unterwegs war, die im Morast des Seeufers einsank und sich nicht wieder befreien konnte – ein gefundenes Fressen für Räuber und Aasjäger. An den zusammenge-

krampften Füßen hat Gabrielle Lyon wohl die Todesangst der Tiere abgelesen.

Wie fantastisch diese Skelette erhalten sind, erkannten wir in vollem Umfang erst nach meiner Rückkehr nach Chicago, als Mitarbeiter von mir sie eines nach dem anderen unter dem Mikroskop sorgsam herauspräparierten und säuberten. Nicht nur dass noch Magensteine vorhanden waren – sie lagen auch so, dass man die Form der muskulösen Mägen zu erkennen meinte. Zudem entdeckten wir einen dünnen Kohlefilm, der die mutmaßlichen Mägen auskleidete: offensichtlich Überreste der letzten Mahlzeit.

Selbstständige Jugendverbände

Schon bei der Ausgrabung hatten wir uns darüber gewundert, dass alle Skelette von recht jungen Tieren zu stammen schienen und offenbar keine erwachsenen – in dem Fall mutmaßlich geschlechtsreifen – Individuen darunter waren. Das erkannten wir an den Wirbeln, denn daran lässt sich im Feld das ungefähre Alter eines Dinosauriers am besten beurteilen. Solch ein Wirbel besteht aus zwei Teilen: dem kompakten, spulenförmigen Wirbelkörper und dem daran angelagerten Wirbelbogen, durch den das Rückenmark zieht. Die beiden Strukturen waren bei jungen Tieren noch nicht miteinander verwachsen – und sie waren es auch bei unseren Skeletten nicht. Die beiden Teile verbanden sich erst fest, wenn die Größe des Tiers praktisch nicht mehr zunahm und es also wohl voll erwachsen war. Wie man heute weiß, wuchsen Dinosaurier, im Gegensatz zu anderen Reptilien, hauptsächlich in der Jugend (siehe auch SdW 5/2006, S. 26).

In Chicago untersuchten wir das Alter der Skelette genauer. Dazu sägten wir von einigen Langknochen der Extremitäten und von den Rippen dünne Scheiben ab und zählten die jährlichen »Wachstumsringe«, die Reptilien ausbilden. Demnach waren diese Tiere zwischen einem und sieben Jahre alt gewesen – die meisten von ihnen zählten ein oder zwei Jahre. Wir schlossen aus den Befunden zum einen, dass *Sinornithomimus* erst mit ungefähr zehn Jahren erwachsen wurde. Noch aufregender fanden wir aber, dass wir anscheinend tatsächlich eine Horde Jugendlicher gefunden hatten.

Denn neben den Todesumständen kannten wir jetzt auch ein wichtiges Detail aus dem Leben von *Sinornithomimus*. Seit Längerem machen sich Paläontologen über das Sozialverhalten halbwüchsiger Dinosaurier Gedanken. Die Skelette aus der Wüste Gobi bestärken nun die Vermutung, dass die älteren Jungen gern in eigenen kleinen Verbänden herumstreiften, bis sie nach etlichen Jahren erwachsen wurden. Manches spricht dafür, dass die Eltern ihren Nachwuchs bald mehr oder weniger sich selbst überließen. Schon in der nächsten Fortpflanzungsphase hatten die geschlechtsreifen Tiere genug anderes zu tun – etwa Partner zu umwerben, Nester anzulegen und zu verteidigen, zu brüten und sich um die neuen Jungen zu kümmern. Die älteren Sprösslinge mussten sich selbstständig durchschlagen, auch wenn sie noch sehr jung und deswegen besonders gefährdet waren. Anscheinend fanden sich dann die Jugendlichen zumindest bei dieser Art zu Gruppen zusammen, schon weil ihnen das mehr Schutz bot.

MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de

Unser Online-Dossier »Saurier«
finden Sie unter

www.spektrum.de/saurier

Unsere Herde hatte allerdings Pech gehabt. Die Stelle, an der den Trupp vor 90 Millionen Jahren das Ende ereilte, mag beim Vorbeiziehen ausgesehen haben wie viele andere harmlose Uferzonen, wo man nur mit den Füßen etwas einsank. Zwei Skelette in der Mitte dieses Fossillagers zeigen das Drama besonders deutlich. Die Oberkörper der beiden Tiere sind übereinandergefallen und zur Seite gesunken. Sie müssen damals aus dem Schlamm geragt haben, denn sie lagen in derselben Schicht. Aber die Beine steckten offenbar tief im Untergrund fest. Beide Skelette sind in einem bemerkenswert kompletten Zustand. Nur die Hüftknochen fehlen – wahrscheinlich bediente sich da ein Raubtier. Zu dieser Deutung passt ein zertretener Beckenknochen, der einzeln lag. Als später der Spiegel des Sees wieder anstieg, deckte neuer Schlamm den Ort zu und konservierte ihn – bis heute. ~

DER AUTOR

Paul C. Sereno ist Paläontologe an der University of Chicago. Er leitete Expeditionen zur Dinosauriersuche auf fünf Kontinenten und entdeckte bis heute mehr als zwei Dutzend neue Dinosaurierarten.

QUELLEN

Kobayashi, Y. et al.: Herbivorous Diet in an Ornithomimid Dinosaur. In: Nature 402, S. 480–481, 1999
Kobayashi, Y., Lü, J.-C.: A New Ornithomimid Dinosaur with Gregarious Habits from the Late Cretaceous of China. In: Acta Palaeontologica Polonica 48, S. 235–259, 2003
Varricchio, D. J. et al.: Mud-Trapped Herd Captures Evidence of Distinctive Dinosaur Sociality. In: Acta Palaeontologica Polonica 53, S. 567–578, 2008

LITERATURTIPP

Norell, M.: Auf der Spur der Drachen. China und das Geheimnis der gefiederten Dinosaurier. Elsevier / Spektrum Akademischer Verlag, München 2007
Erlebnisse eines Paläontologen in China, mit vielen Bildern und wissenschaftlichem Hintergrund

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1130107**

INTERVIEW

Die vergessenen Seuchen

Chagas-Krankheit, Leishmaniose, Afrikanische Schlafkrankheit – Millionen Menschen leiden unter einer dieser tropischen Infektionskrankheiten, und dennoch haben Pharmafirmen und staatliche Gesundheitssysteme die Seuchen jahrzehntelang praktisch ignoriert. Die DNDi (Drugs for Neglected Diseases initiative) bringt seit acht Jahren Regierungen und Firmen, Forscher und Stiftungen an einen Tisch, um die Entwicklung neuer Wirkstoffe anzustoßen. Auf dem Berliner World Health Summit 2011 befragte »Spektrum der Wissenschaft« den Präsidenten der DNDi, **Bernard Pécoul**, zu den Bemühungen und Erfolgen der Organisation.

Spektrum: Herr Dr. Pécoul, warum werden vergleichsweise häufige Krankheiten wie Leishmaniose oder Chagas-Krankheit von Forschern vernachlässigt?

Dr. Bernard Pécoul: Solche »Neglected Diseases« sind zwar in der Tat recht verbreitet, aber aus betriebswirtschaftlicher Perspektive lohnt sich die Entwicklung von Medikamenten für Pharmafirmen nicht. Das liegt daran, dass die überwiegende Mehrheit der Patienten in wirtschaftlich schwachen Ländern lebt, in Entwicklungsländern. Aber auch in Schwellenländern wie Indien sind die Erkrankungen verbreitet, wobei dort die Betroffenen meist armen Schichten zugehören. Es handelt sich vor allem um Infektionskrankheiten, die noch immer die wichtigste Ursache für die hohe Sterblichkeit der Ärmsten der Welt darstellen.

Und das nur, weil der Absatzmarkt für solche Medikamente fehlt?

Pécoul: Bei den vernachlässigten Krankheiten hat sowohl der private als auch der öffentliche Sektor versagt. Es wäre zu einfach, nur die Pharmafirmen zu beschuldigen, dass sie nicht investieren, denn diese müssen auf Refinanzierung achten. Die Firmen werden daher erst unter Führung oder auch auf Druck der öffentlichen Hand aktiv. Das bedeutet nicht, dass neue Medikamente oder Impfstoffe in Zukunft in staatlichen Forschungsinstituten entwickelt werden müssten. Aber es gilt, den Entwicklungsprozess zu stimulieren, Prioritäten zu setzen und Rahmenbedingungen sowie Anreize zu schaffen.

Kommen denn solche Krankheiten in Europa überhaupt nicht vor?

Pacoul: Doch. Ich zähle auch Malaria und Tuberkulose zu den Neglected Diseases, denn die große Mehrzahl der Patienten ist in Entwicklungsländern zu finden. Nichtsdestotrotz gibt es auch in Europa Fälle. Darüber hinaus sind wir hier ja mit einem globalen Gesundheitsproblem konfrontiert. Denn wenn wir zum Beispiel nicht die Tuberkulose in Afrika oder Russland angehen und neue Medikamente gegen diese Bakterien entwickeln, die teilweise schon gegen alle vorhandenen Antibiotika resistent sind, dann werden in ein, zwei Jahrzehnten Deutschland und andere europäische Länder das Problem selbst haben.

Diese **Offenheit kommt** im pharmazeutischen Geschäft **sonst nicht vor**

Vernachlässigte Krankheiten betreffen Millionen Menschen. Aber auch für Patienten mit seltenen Erbkrankheiten stehen oft keine Medikamente zur Verfügung.

Pécoul: Solche so genannten Orphan Diseases, was so viel wie verwaiste Krankheiten bedeutet (in Deutschland heißen sie seltene Krankheiten), sind ähnlich benachteiligt wie die Neglected Diseases: Auch hier fehlen Investitionen in Forschung und Entwicklung von Medikamenten.

Für die Orphan Diseases gewähren die USA und auch Europa ein beschleunigtes Zulassungsverfahren und verlängerten Patentschutz als Anreiz für die Firmen, in die Entwicklung solcher Medikamente zu investieren. Braucht es solche Werkzeuge auch für Neglected Diseases?

Pécoul: Vielleicht. Ich habe selbst einige Zeit lang untersucht, ob der Orphan Drug Act auch die Entwicklung von Arzneien gegen vernachlässigte Krankheiten fördern kann. Da eine Krankheit wie Malaria in Europa und den USA nur wenige Reisende betrifft, könnte sie insofern als seltene Erkrankung im Sinne des Gesetzes gelten, selbst wenn sie in Afrika sehr häufig ist. Aber wir brauchen mehr als das, wir müssen bessere internationale Rahmenbedingungen schaffen. Das Mandat für derartige Schritte liegt bei der Weltgesundheitsorganisation WHO.

DNDI / LAURENT EGLI

Dr. Bernard Pécoul war nach Abschluss seines Medizinstudiums an Gesundheitsprojekten für Flüchtlinge in Asien beteiligt und trat 1983 den »Ärzten ohne Grenzen« bei, deren französische Abteilung er von 1991 bis 1998 leitete. Seit ihrer Gründung 2003 steht er der »Drugs for Neglected Diseases initiative« (DNDi) mit Sitz in Genf vor.

Liegen die Ideen für neue Medikamente gegen Neglected Diseases denn schon auf der Hand und müssten nur noch umgesetzt werden, oder sind diese Krankheiten bisher nicht ausreichend erforscht?

Pécoul: Wir müssen unterscheiden zwischen der Grundlagenforschung und der klinischen Forschung, die Ideen aus der Grundlagenforschung testet und daraufhin Medikamente entwickelt. Bei den meisten Neglected Diseases gibt es eine gute Forschungsgrundlage. Was fehlt, ist die Umsetzung dieser Forschungsergebnisse in Produkte, in Therapien. Das ist traditionell die Rolle von Pharmafirmen, doch bislang fehlten die Anreize für die Firmen, sich in diesem Feld zu engagieren. Insbesondere gilt das für Leishmaniose und Schlafkrankheit, die im Grunde komplett ignoriert werden.

Organisationen wie die GAVI (Global Alliance for Vaccines and Immunisation) Foundation versuchen, diese Anreize zu schaffen, indem sie mit Hilfe von Stiftungen und Abkommen mit den Regierungen der bedürftigen Länder einen zwar nicht großen, dafür aber sicheren Absatzmarkt garantieren. Damit wird das Investitionsrisiko bezüglich Impfstoffproduktionsanlagen für die Firmen kalkulierbar. Funktioniert Ihr Engagement für Neglected Diseases nach dem gleichen Prinzip?

Pécoul: Wenn man die Medikamentenentwicklung fördern will, kann man – bildlich gesprochen – den Karren anschieben oder ziehen. Experten sprechen hier von Push- und Pull-Mechanismen. GAVI versucht die Unternehmen auf einen Markt zu »ziehen«, den sie durch Verhandlungen mit den Regierungen sowie mit Finanzhilfen der Bill & Melinda Gates Foundation schafft. So kann eine Pharmafirma sicher sein, dass ihr über einen bestimmten Zeitraum eine festgelegte Menge an Impfstoff abgenommen wird. Damit wird das Risiko der Investition in die Entwicklung und Produktion von Impfstoffen absehbarer. DNDi arbeitet eher im »Push«-Modus: Wir stoßen die Entwicklung neuer Medikamente selbst an, allerdings nicht auf Ebene der Grundlagenforschung. Wir steigen erst ein, wenn wir einen Wirkstoffkandidaten gefunden haben, der in vorklinischen Tests ein gewisses Erfolgspotenzial offenbart hat.

Wie erfahren Sie denn überhaupt von solchen möglichen Wirkstoffen? Meist sind das doch sehr vertrauliche Daten, die die Pharmafirmen sorgsamst vor fremden Augen hüten.

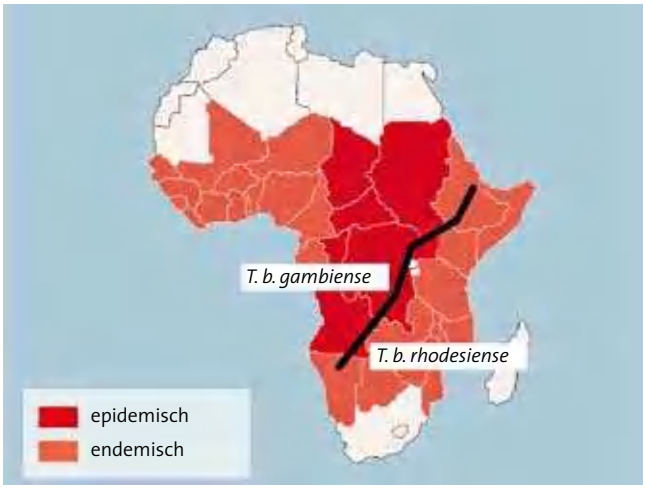
Pécoul: Zum einen natürlich aus den öffentlich zugänglichen Forschungsarbeiten, vor allem aber sprechen wir mit Grundlagenforschern und Pharmaforschungsexperten und nutzen deren Netzwerke. Im Fall von Fexinidazol, unserem Wirkstoffkandidaten gegen die Schlafkrankheit, informierte uns ein Wissenschaftler, dass die Firma Hoechst Marion Roussell (heute Teil von Sanofi Pasteur) in den 1980er Jahren an der Substanz gearbeitet, sie dann aber fallen gelassen hatte. Das Anzapfen dieses Netzwerks funktioniert ziemlich gut. Daneben organisieren wir auch systematische Untersuchungen der Substanzbibliotheken der großen Pharmafirmen. Über den Zugang zu diesen Sammlungen müssen wir mit den Firmen verhandeln.

Normalerweise hüten sich die Pharmafirmen, anderen Zugang zu ihren Substanzbibliotheken zu gewähren, damit ihnen kein lukrativer Wirkstoff weggeschnappt wird. Ist es nicht an der Zeit, eine öffentlich zugängliche Wirkstoffsammlung zu schaffen?

Pécoul: Das ist tatsächlich gerade ein heißes Thema. In Genf ist kürzlich eine Initiative der WIPO, der World Intellectual Property Organization, ins Leben gerufen worden, die eine Substanzbibliothek für Neglected Diseases schaffen soll, Re:Search genannt. Ein ähnliches Projekt hatte GlaxoSmithKline vor einiger Zeit gestartet, doch jetzt sollen die Informationen von acht großen Pharmafirmen und öffentlichen For-

AG. FOCUS / SPL / WHO, TDR, ANDY CRUMP

schungsinstituten zusammengeführt und allgemein zugänglich gemacht werden. DNDi ist dieser Initiative beigetreten, weil das grundsätzlich eine gute Sache ist. Sie hat aber leider eine wichtige Einschränkung. Wenn DNDi über den Zugang zur Substanzbibliothek einer Pharmafirma verhandelt, dann stellen wir sicher, dass wir die volle Handlungsfreiheit haben, wenn wir einen Wirkstoff finden. Und zwar in allen Ländern, in denen die Krankheit endemisch ist. Die Initiative der WIPO gewährt dies nur für Patienten in den ärmsten Entwicklungsländern. Und das muss absolut nicht identisch mit der geografischen Verbreitung von Erkrankungen wie Chagas oder Schlafkrankheit sein.



DNDi

Die Afrikanische Schlafkrankheit wird von dem Parasiten *Trypanosoma brucei* verursacht, der durch Stiche der Tsetsefliege übertragen wird. In West- und Zentralafrika dominiert die Subspezies *T. b. gambiense*, in Ostafrika *T. b. rhodesiense* (schwarze Trennungslinie).

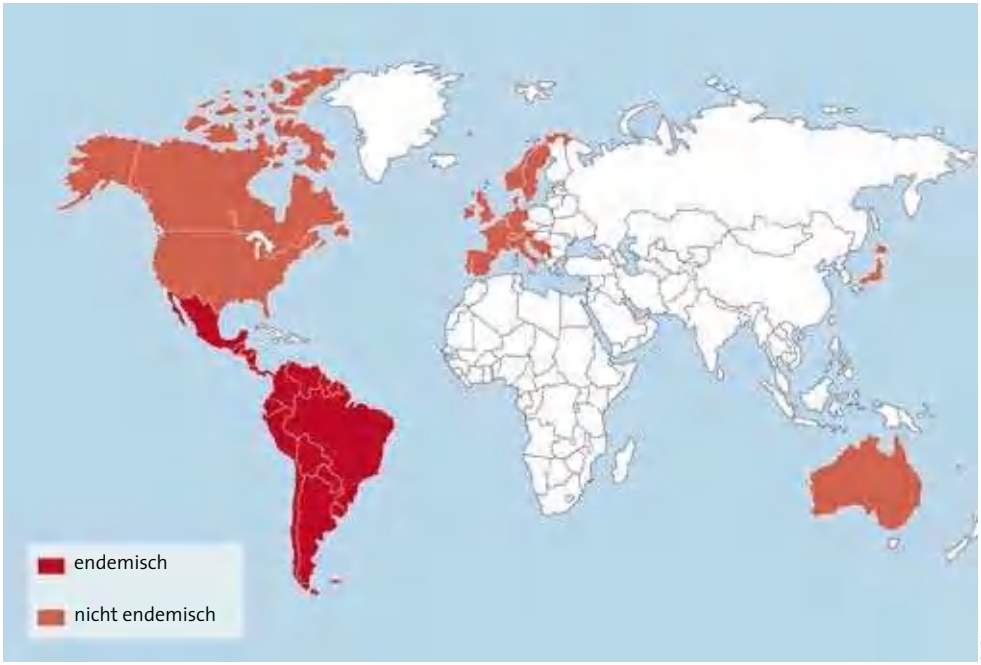
Können Sie an einem Beispiel erläutern, wie DNDi neue Wirkstoffe gegen Neglected Diseases entwickelt?

Pécoul: Bei der Schlafkrankheit beispielsweise gab es eine sehr schlechte Ausgangslage und dringenden Handlungsbedarf: Das vorhandene Medikament Melarsoprol, ein Arsenderivat, tötet etwa jeden 20. Patienten! In bereits vorhandenen Forschungsergebnissen zur Schlafkrankheit fanden wir eine Substanz, die von Bayer entwickelt worden war (Nifurtimox), sowie eine andere Substanz von Sanofi (Eflornithin), die beide in Tests eine gewisse Wirkung gegen den Parasiten gezeigt hatten. Wir beschlossen, die zwei Wirkstoffe zu kombinieren und in klinischen Studien zu testen. Die Ergebnisse präsentierten wir der WHO, die daraufhin den Einsatz des Kombinationspräparats empfahl.

Wie sieht es bei der Chagas-Krankheit aus?

Pécoul: Es gibt eine Therapie für die frühe akute Phase, aber nicht für die darauf folgende chronische, unter der die meisten Patienten leiden, weil die akute Phase schwierig zu diagnostizieren ist. Die Herausforderung besteht darin, ein Mittel zu entdecken, das noch in der frühen chronischen Phase wirkt. Genau so eine Wirkstoffklasse haben wir gefunden, so genannte Azole. Die Verhandlung mit Schering-Plough, wo Forscher solche Azole entwickelt haben, scheiterten zwar zunächst. Aber die japanische Firma Eisai hat zugestimmt, ihr Azol E1224 für von Chagas betroffene Länder zum Selbstkostenpreis zu produzieren. Inzwischen gehört Schering-Plough zur US-amerikanischen Firma Merck, die ihre Azole derzeit testet und die Resultate dann mit unseren vergleichen wird. Sollte das Merck-Produkt besser abschneiden, ist bereits eine Übereinkunft mit DNDi angekündigt. Diese Offenheit innerhalb und zwischen diesen Produktentwicklungspartnerschaften kommt im pharmazeutischen Geschäft sonst nicht vor und ist nur möglich, weil die Märkte

Die Leishmaniose wird durch den Parasiten *Leishmania* ausgelöst, den Sandfliegen übertragen. Das Bild links zeigt eine Form der Krankheit, die oft mit Lepra verwechselt wird und medikamentös schwer zu behandeln ist. Der Parasit *Trypanosoma cruzi* verursacht die Chagas-Krankheit, die in Lateinamerika endemisch ist (rechts).



in den Entwicklungsländern keine Bedeutung für die Bilanzen haben.

Können Sie auch noch von anderen Fällen berichten, bei denen Sie solch ungewöhnlicher Offenheit begegneten?

Pécoul: Unser bester Wirkstoffkandidat gegen Leishmaniose kommt zum Beispiel von einer Produktentwicklungspartnerschaft namens TB Alliance. Die Kollegen haben uns alle Informationen zugänglich gemacht, die sie beim Durchsuchen einer Substanzbibliothek nach Medikamenten gegen Tuberkulose gesammelt hatten. Wir testeten einige der Moleküle, die sich dabei als wirksam herausgestellt hatten, auch mit dem Leishmanioseerreger und identifizierten so den bislang potentesten Wirkstoff gegen diese Krankheit. Wir haben also von den Bemühungen anderer profitiert – das wäre in der klassischen Medikamentenentwicklung, in der Pharmafirmen in ständiger Konkurrenz zueinander stehen, nie vorgekommen.

Wie sorgen Sie dafür, dass der Preis des Medikaments am Ende nicht zu hoch für die Länder beziehungsweise die Patienten ist?

Pécoul: Wenn wir mit einer Pharmafirma Absprachen treffen, stellen wir immer zuerst den uneingeschränkten Zugriff auf die Arznei sicher. Dazu gehört auch das Aushandeln der Preiskonditionen: Kosten deckend plus eine geringe Gewinnmarge – etwa vergleichbar mit dem Geschäft mit Nachahmerpräparaten (Generika). Da wird zwar Geld verdient, aber nicht so viel, wie nötig wäre, um die Neuentwicklung des Medikaments zu refinanzieren. Und in unserem Fall trägt DNDi die Entwicklungsinvestitionen, zum Beispiel die Kosten für die teuren klinischen Studien.

Woher bekommt DNDi das Geld dafür?

Pécoul: Die eine Hälfte stammt aus dem öffentlichen Sektor, zum Beispiel von der spanischen Regierung und hoffentlich auch bald der deutschen. Die andere Hälfte stemmen Stiftungen wie der Wellcome Trust oder die Gates-Stiftung. Wir möchten innerhalb von 15 Jahren 13 Behandlungsoptionen für Patienten mit Neglected Diseases schaffen, mit einem Budget von rund 550 Millionen Dollar (400 Millionen Euro), also weniger als 50 Millionen pro Medikamentenentwicklung – was vergleichsweise sehr wenig ist.

> Gerade weil die Firmen **kein großes Risiko** eingehen müssen, arbeiten sie auch mit uns zusammen

Eine ketzerische Frage: Warum sollten die Firmen überhaupt etwas verdienen, wenn DNDi das ganze Risiko der Wirkstoffentwicklung schultert?

Pécoul: Wir wollen eine nachhaltige Versorgung mit den entwickelten Medikamenten garantieren und sicherstellen, dass die Firmen mit Produktion, Verteilung und Verkauf einer erfolgreichen Arznei fortfahren, wenn die Zusammenarbeit mit DNDi ausläuft. Dazu bieten wir einen Anreiz. Außerdem müssen die Pharmafirmen durchaus in Labor- und Produktionsanlagen investieren, um ihren Teil der Vereinbarung mit DNDi zu erfüllen. Dennoch ist es richtig, dass die Firmen kein übermäßig großes Risiko eingehen. Aber genau deshalb arbeiten auch viele Pharmafirmen mit uns zusammen.

Die Fragen stellte **Sascha Karberg**, freier Wissenschaftsjournalist in Berlin.

MIKROPHYSIK

Hamlet in der Quantenwelt

Ausgeklügelte Experimente an den Universitäten Heidelberg und Wien rütteln an der gewohnten Logik: In der skurrilen Welt der Quanten kann – in Abwandlung von Shakespeares Hamlet-Monolog – etwas zugleich sein und nicht sein.

Von Markus Arndt, Markus Oberthaler und Jörg Schmiedmayer

Hamlets Frage in Shakespeares berühmtem gleichnamigem Theaterstück lautet »Sein oder Nichtsein«. Doch in der modernen Physik muss diese Alternative unter bestimmten Umständen durch »Sein *und* Nichtsein« abgelöst werden, wie Quantenexperimente immer wieder belegen. Solche Resultate setzen ein Fragezeichen hinter das, was wir im Alltag unter Sein, Realität, Raum oder Zeit verstehen.

Eine bis heute gültige mathematische Formulierung der Quantenmechanik entstand 1926 mit der Wellengleichung des Wiener Physikers Erwin Schrödinger (1887–1961). Er baute seine Theorie auf der Hypothese des Pariser Wissenschaftlers Louis de Broglie (1892–1987) auf, dass mit jedem materiellen Objekt auch ein Wellenphänomen assoziiert sein muss. De Broglie selbst hatte zunächst noch keine klare Vorstellung, wie diese Welle zu interpretieren sei, aber er war so stolz auf seine Vorhersage, dass er schon 1923 vermutete, sie werde »... fast alle Probleme lösen, die durch die Quanten aufgebracht wurden«. Es dauerte nicht lange, bis seine Vermutung sich bestätigte (siehe Kasten S. 42).

De Broglies Wellenhypothese und Schrödingers Wellengleichung waren der Ausgangspunkt für eine mehr als 85-jährige quantenphysikalische Erfolgsgeschichte. Hunderte von modernen Experimenten und Technologien funktionieren nur, weil die Quantentheorie zutrifft. Zugleich bleibt aber bis heute die Frage offen: Was ist denn eigentlich die Wellenfunktion ψ, die sich über große Raumbereiche ausbreiten kann und dennoch auch das Verhalten von sehr kleinen, lokalisierten Einzelobjekten beschreibt? Zum Beispiel kann die Wellenfunktion in zwei weit voneinander entfernten Regionen um die Punkte x_1 und x_2 von Null verschiedene Werte annehmen. So etwas erscheint uns durchaus normal, wenn wir zum Beispiel an Wasserwellen denken. Es mutet aber bizarr an, wenn die Wellenfunktion die Eigenschaften eines materiellen Einzelkörpers bestimmen soll. Wie kann dieser zugleich an verschiedenen Orten sein oder sich – wie später beschrieben – zugleich nach rechts und nach links bewegen?

AUF EINEN BLICK

KAPRIOLEN DER WELLENMECHANIK

1 In der klassischen Mechanik nehmen **Teilchen** eindeutig definierte Orte ein und bewegen sich auf ganz bestimmten Bahnen. In der Quantenphysik haben Teilchen auch **Wellencharakter**.

2 Das gilt sogar für große und komplexe Moleküle. Sie offenbaren ihre Wellennatur im Experiment durch **Interferenzmuster**, die sich nur quantenmechanisch erklären lassen.

3 Wenn ein Atom knapp vor einem Spiegel ein Photon emittiert, kann es zu einer **Verschränkung mit dem Spiegelbild** kommen.

Wenn große Moleküle Wellen schlagen

Noch ist unklar, warum unsere Alltagswelt, die ja letztlich im Kleinen auf Quantenobjekten beruht, uns dennoch im Großen und Ganzen so »normal« erscheint. Um dem nachzugehen, erforscht das Team um Markus Arndt an der Universität Wien schon seit mehreren Jahren Materiewellen, die keine Elementarteilchen beschreiben, sondern wesentlich komplexere Systeme – insbesondere große Moleküle. Dabei steht die Frage im Vordergrund, unter welchen Umständen bei zunehmender Masse und Komplexität der Moleküle die Quanteneigenschaften erhalten bleiben.

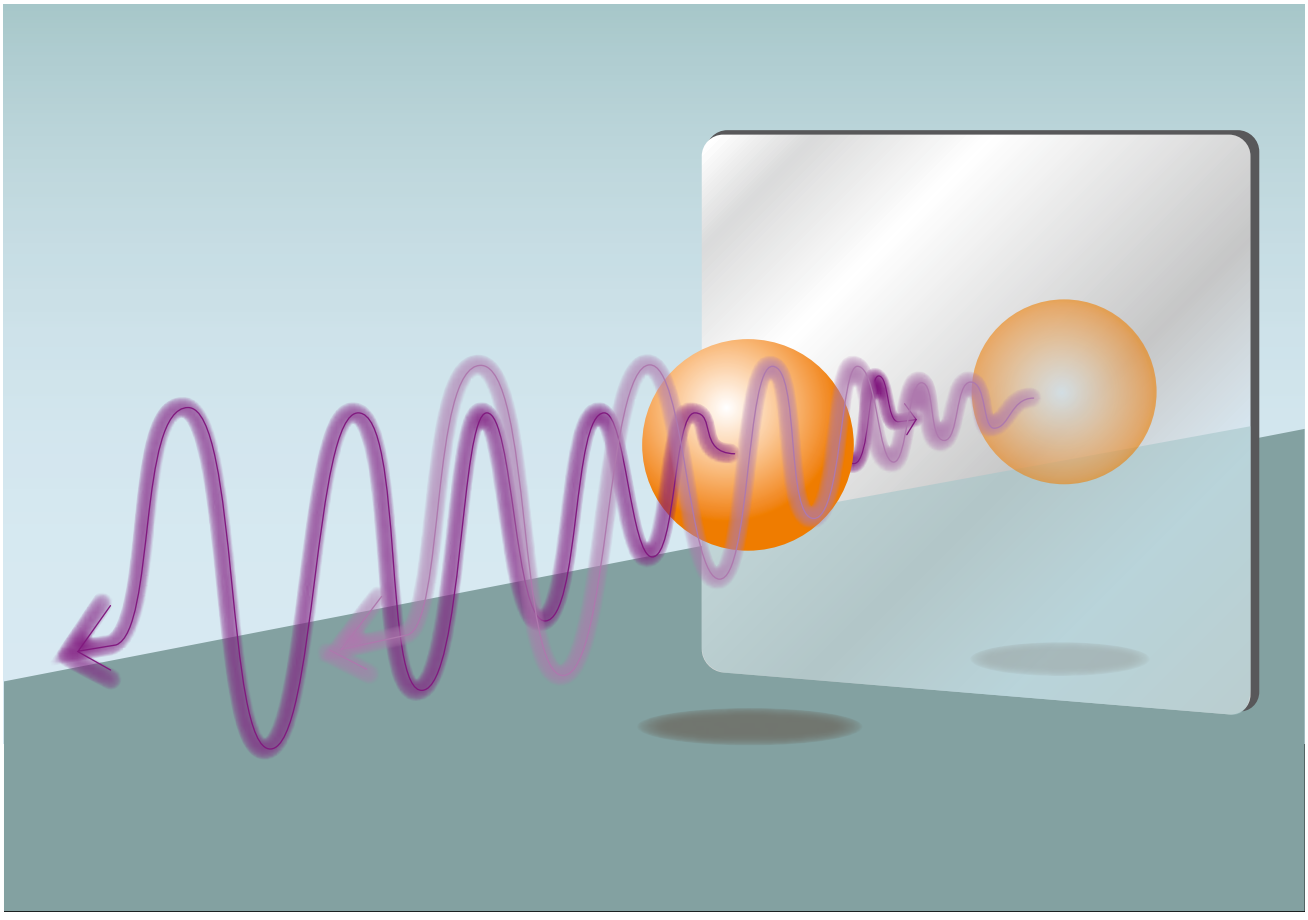
Die Experimentreihe begann 1999, als im Team der Universität Wien – damals geleitet von Anton Zeilinger – erstmals das quantenmechanische Wellenverhalten des Fullerenmoleküls C_{60} nachgewiesen wurde. In der Gruppe von Markus Arndt und Stefan Gerlich wurden inzwischen die Nachweisinstrumente zunehmend verfeinert, bis hin zu einem Interferometer, das auf den Namen Kapiza-Dirac-Talbot-Lau (KDTL) getauft wurde; es kombiniert die Idee der Quantenphysiker Pjotr Kapiza (1894–1984) und Paul Dirac (1902–1984), Materie an Licht zu beugen, mit der linsenlosen Selbstabbildung von Wellenfeldern durch die Optiker William Henry Fox Talbot (1800–1877) und Ernst Lau (1893–1978).

Im KDTL-Interferometer (Bild S. 43) werden drei Gitter verwendet, um die quantenmechanische Materiewellen-

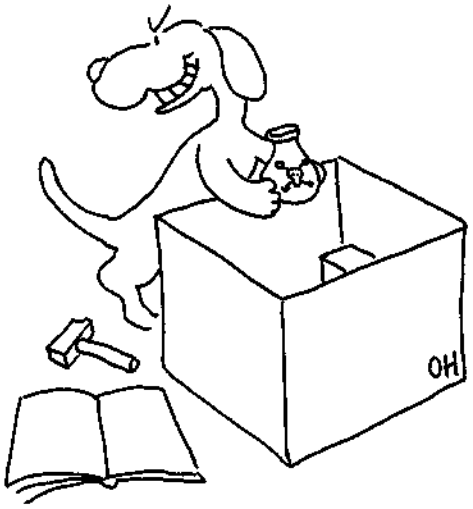
natur großer organischer Komplexe nachzuweisen. Das erste Gitter aus Siliziumnitrid schneidet zunächst aus dem einlaufenden Molekülstrahl räumlich periodische Pakete einzelner Moleküle aus, die sich – jedes für sich – hinter dem Gitter gemäß der Schrödingergleichung wellenförmig ausbreiten. Am Ort des zweiten Gitters, das aus einer stehenden Lichtwelle besteht, gibt es für jedes Molekül mindestens zwei prinzipiell ununterscheidbare Möglichkeiten, durch den einen oder den anderen Bauch der stehenden Welle zu fliegen. Dahinter entsteht eine räumlich periodische Wahrscheinlichkeitsverteilung der molekularen Materiewelle; das heißt, das Molekül ist hinter dem zweiten Gitter mehr oder weniger wahrscheinlich an einem bestimmten Ort anzutreffen – und die Wahrscheinlichkeitsamplituden können sich konstruktiv verstärken oder destruktiv auslöschen. Das dritte Gitter erlaubt, das daraus resultierende Teilchendichtemuster abzutasten: Wird dieses Gitter kontinuierlich verschoben, können die Moleküle es abwechselnd passieren oder nicht. Das dabei im Detektor entstehende sinusförmige Intensitätsmuster zeigt die Interferenz an – ein typisches Wellenphänomen. Ob das beobachtete Muster mit den Gesetzen der Quantenphysik übereinstimmt, lässt sich dann durch direkten Vergleich mit der theoretischen Vorhersage bestimmen.

Zum Erfolg dieser Experimente trugen chemische Kunststücke von Jens Tüxen und Marcel Mayor bei, die sich an der Universität Basel auf die Synthese neuartiger molekularer Komplexe spezialisiert haben. Um die Wellennatur von Molekülstrahlen in Interferometern nachzuweisen, müssen spezifische molekulare Eigenschaften sehr präzise präpariert werden. So müssen sich die chemischen Verbindungen leicht verdampfen lassen, ohne ihre möglichst komplexe Struktur einzubüßen. Die Basler Chemiker gingen zu diesem Zweck von einem so genannten Porphyrin aus – einem schon an

Die spontane Aussendung eines einzelnen Photons kann das emittierende Atom in eine Überlagerung mit seinem Spiegelbild versetzen, sofern das Atom sich sehr nahe am Spiegel aufhält. Der Emissionsvorgang erzeugt eine Verschränkung von Atom (orange) und Photon (lila). Das Photon kann sowohl vom Spiegel weg emittiert werden (dunkellila) als auch zum Spiegel hin, mit anschließender Reflexion (helllila). Beide Möglichkeiten sind quantenphysikalisch ununterscheidbar.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK



sich recht komplizierten organischen Molekül –, an das sie zusätzlich fluorreiche Alkylketten anhängten. Zufällig standen aus früheren Produktionsprozessen, die der Chemiker Paul Fagan bei der US-Firma Dupont entwickelt hatte, noch weitere Verbindungen mit den gewünschten Eigenschaften zur Verfügung.

Die verschiedenen Verbindungstypen enthalten pro Molekül bis zu 430 Atome; jedes Molekül ist gestreckt mehr als fünf Nanometer (millionstel Millimeter) groß und fast 7000 atomare Masseneinheiten schwer. Damit erreicht es schon die Größenordnung eines kleinen Proteins.

Alle diese Verbindungen zeigten in den neuen Experimenten echte Quanteninterferenz. Das bedeutet: Im Teilchenstrahl sind selbst einzelne große und komplexe Moleküle quer zur Flugrichtung um mehr als das 100-Fache ihres eigenen Durchmessers delokalisiert – ihr Ort ist quantenmechanisch über diese Distanz prinzipiell unbestimmbar. Interessanterweise lässt sich der ungewöhnliche Zustand sogar bei Temperaturen von 400 Grad Celsius über viele tausendstel Sekunden hinweg aufrechterhalten.

Welle-Teilchen-Dualismus

Materiewellen wurden schon im Jahr 1927 in den amerikanischen Bell-Laboratorien von Clinton Davisson (1881–1958) und Lester Germer (1896–1971) anhand der Rückstreuung von Elektronen an einer Kristalloberfläche nachgewiesen. Dieses Experiment kam skurrilerweise erst durch einen Unfall zu Stande, der die Vakuumapparatur zerstörte.

Um die durch einen Lufteinbruch verunreinigte Oberfläche zu säubern, wurde die Nickelprobe stark erhitzt. Dadurch erst bildeten sich die homogenen Kristallflächen, welche die Beugung der Elektronen sichtbar machten. Nur drei Jahre später konnten die Hamburger Kollegen Immanuel Estermann (1900–1973) und Otto Stern (1888–1969) auch Heliumatome und Wasserstoffmoleküle an einer Kristalloberfläche beugen und damit zeigen, dass die Ausbreitung solcher zusammengesetzter Objekte ebenfalls im quantenmechanischen Wellenbild verstanden werden kann.

Ein ununterscheidbares Spiegelbild

Das zweite Experiment, das wir hier besprechen, basiert auf einem Überlagerungszustand, der ein einzelnes Argonatom untrennbar mit dem Schicksal eines einzelnen von diesem Atom ausgesandten Lichtteilchens verknüpft – wobei Letzteres sich seinerseits in einer Superposition aus zwei Flugrichtungen befindet.

Das ist ein Paradebeispiel für eine Quantensuperposition, die zwei Systeme – hier Atom und Licht – miteinander verknüpft. In diesem Fall hat keines der Objekte für sich allein einen klar definierten Zustand – aber wir können dennoch eine sichere Vorhersage treffen, wie sich das eine Objekt verhält, wenn wir seinen Partner beobachten. Für diese untrennbare Quantenkorrelation hat Erwin Schrödinger seinerzeit das Wort Verschränkung geprägt (siehe Kasten rechts oben).

Jörg Schmiedmayer von der Technischen Universität Wien und Markus Oberthaler von der Universität Heidelberg fragten sich: Was passiert, wenn ein Atom in einer dunklen Vakuumkammer sehr nahe an einem ebenen, hochreflektierenden Spiegel vorbeifliegt und dort spontan ein Lichtquant aussendet? Auch für das Quantensystem Atom-Photon gilt natürlich das physikalische Gesetz der Impulserhaltung. Wird ein Photon beispielsweise nach rechts emittiert, so erfährt das Atom einen Rückstoß nach links, und umgekehrt (siehe Bild S. 44).

Egal ob das Photon nun zum Spiegel hin- oder von ihm wegfliegt: Ein auf den Spiegel schauender Beobachter sieht in beiden Fällen ein Lichtquant auf sich zukommen. Er kann prinzipiell nicht erschließen, ob das Photon zuerst von ihm weg zum Spiegel oder gleich direkt zu ihm, dem Beobachter, hin ausgesandt wurde. Quantenphysikalisch gesprochen: Der Spiegel »löscht die Information«, die besagt, in welche Richtung das Photon ursprünglich emittiert wurde. Daher gerät das Atom in eine Überlagerung von zwei Impulszu-

Verschränkung

Als Verschränkung bezeichnet man die untrennbare Korrelation zweier oder mehrerer Quantenobjekte, deren jedes sich in einer Überlagerung von gemäß der klassischen Physik einander ausschließenden Zuständen befindet. Nichts und niemand – weder Mensch noch »Natur« – kennen einen definitiven Zustand des Einzelobjekts, aber dennoch besteht zwischen den verschränkten Teilchen eine Korrelation, die mit Sicherheit eine Vorhersage darüber erlaubt, welchen Zustand man bei dem einen Teilchen findet, wenn das andere gemessen wird.

Angenommen, ein Atom A emittiert ein Photon P nach rechts oder links. Im Quantenformalismus bezeichnet

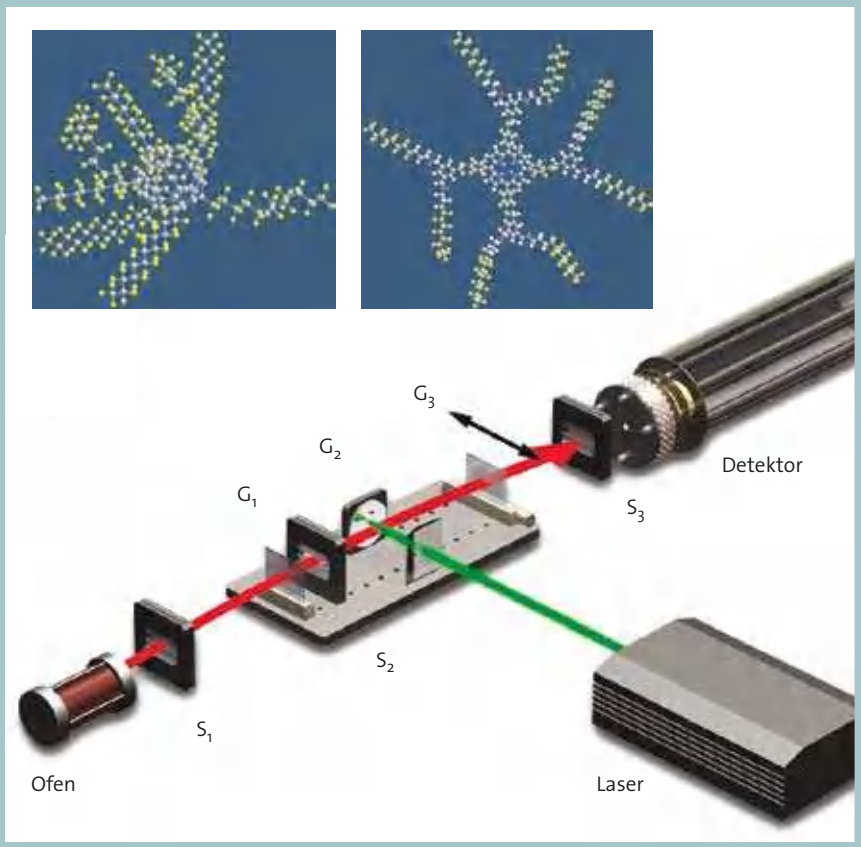
$$|\psi\rangle = a \cdot |\leftarrow_A\rangle|\rightarrow_P\rangle + b \cdot |\rightarrow_A\rangle|\leftarrow_P\rangle$$

einen Zustand, in dem das Photon P sich in einer Überlagerung einer Bewegung nach rechts und nach links befindet, während auf Grund der Impulserhaltung das emittierende Atom A die dazu komplementäre Überlagerung bildet: Es bewegt sich nach links, wenn es ein Photon nach rechts emittiert hat, und umgekehrt. Die Amplituden a und b deuten an, dass eine unendliche Zahl von Variationen dieser Verschränkung existiert. Solche Quantenkorrelationen werden andernorts in Experimenten zur Quanteninformationsverarbeitung ausgenutzt (siehe Spektrum-Dossier 4/2010 »Quanteninformation«).

ständen und befindet sich in einem Überlagerungszustand beider denkbarer Rückstoßrichtungen. Das emittierte Photon wirkt somit als quantenmechanischer Strahlteiler für das Atom.

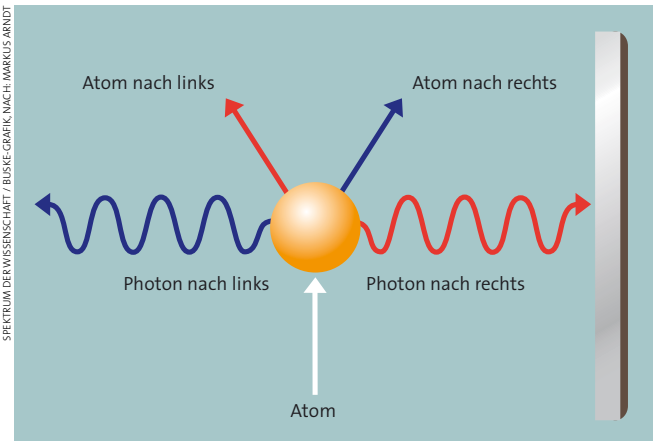
Der Versuch wurde in Heidelberg realisiert, indem ein Laserstrahl das Atom unmittelbar vor dem Spiegel auf ein höheres Energieniveau anregte. Auf Grund der kurzen Lebensdauer der Anregung wird diese Energie gleich wieder als Lichtquant vor der Spiegeloberfläche abgestrahlt.

Nun gilt es zu beweisen, dass die Teilung der atomaren Wellenfunktion »kohärent« ist, das heißt, dass die Wellenfunktion mit festgelegter Phase in zwei verschiedene Richtungen zugleich gelenkt wird. Zu diesem Zweck werden im Experiment die beiden Teilstrahlen durch Beugung an einer zusätzlichen stehenden Laserwelle wieder zusammengeführt. Wenn das knapp am Spiegel emittierte Photon als kohärenter Strahlteiler wirkt, muss durch die Überlagerung der beiden Atompfade ein atomares Interferenzmuster entste-



Im Kapiza-Dirac-Talbot-Lau-Interferometer konnten Physiker die quantenmechanische Wellennatur von komplexen organischen Verbindungen nachweisen. Die Spaltblenden S_1, S_2 und S_3 begrenzen und homogenisieren den Molekülstrahl. G_1, G_2 und G_3 sind Beugungsgitter; G_2 besteht aus einer stehenden Laserlichtwelle; G_3 ist seitwärts beweglich und tastet das Interferenzmuster ab. Die Moleküle, die jeweils aus bis zu 430 Atomen bestehen, wurden von Paul Fagan von der Firma Dupont (linkes kleines Bild) sowie von Jens Tüxen und Marcel Mayor an der Universität Basel (rechtes Bild) so maßgeschneidert, dass sie trotz ihrer hohen Masse gut verdampfen und für die kurze Zeit des Experiments das Erhitzen überstehen.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK, NACH: MARKUS ARNDT UND STEFAN GERLICH



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK, NACH: MARKUS ARNDT

Die atomare Wellenfunktion wird durch Emission eines Photons nahe am Spiegel in zwei Komponenten aufgespalten. Da die Lichtwege zum Spiegel hin und vom Spiegel weg nicht unterscheidbar sind, wird auch der damit assoziierte Materiewellenimpuls des Atoms in beiden Richtungen quantenmechanisch ununterscheidbar.

hen, wie man es von Wellenfunktionen erwarten würde. Und genau das haben wir in Heidelberg tatsächlich beobachtet.

Wird der Spiegel entfernt, dann werden die beiden Wege unterscheidbar. Das Photon trägt die Information über den Weg, und man beobachtet *keine* Interferenz.

In der Praxis ist natürlich alles komplizierter. Das Licht wird in der Regel schräg zum Spiegel ausgesandt, und man muss über verschiedene atomare Geschwindigkeiten mitteln. Aber die Experimente zeigen ohne Zweifel, dass ein Atom sich seinen eigenen Materiewellenstrahlteiler »huckepack« mitbringen kann, indem es durch Emission eines Photons einen verschränkten Licht-Materie-Zustand erzeugt. Entscheidend ist dabei die Nähe der Spiegeloberfläche; sie garantiert die prinzipielle Ununterscheidbarkeit verschiedener möglicher Lichtwege.

Man kann nun überlegen, ob nicht das Lichtteilchen, wenn es am Spiegel reflektiert wird, diesem einen *messbaren* Impuls überträgt. Damit stellt man die zentrale Frage eines Gedankenexperiments, das sich Albert Einstein (1879–1955) in einer legendären Diskussion mit Niels Bohr (1885–1962) über die Grundlagen der Quantenphysik ausdachte. Damals postulierte Einstein: Wenn der Strahlteiler – im Gedankenexperiment ein Doppelspalt – genügend leicht ist, lässt sich der von ihm erlittene Rückstoß verwenden, um den Weg eines Teilchens im Interferometer zu bestimmen.

Diese Überlegungen lassen sich auf das Heidelberger Experiment anwenden: Das einzelne Photon wirkt als der leichteste vorstellbare Strahlteiler, da es bekanntlich überhaupt keine Ruhemasse hat. Durch Messen der Richtung des emittierten Photons lässt sich somit der Weg des Atoms bestimmen. Die Ununterscheidbarkeit der Wege ist aufgehoben, und es gibt keine Interferenz. Wird das Photon hingegen von einem Spiegel reflektiert, der so schwer ist, dass man den Rückstoß der Reflexion *prinzipiell nicht messen kann*, so vermag ein Beobachter unmöglich festzustellen, ob das Photon direkt zu ihm kam oder ob es zuerst am Spiegel reflektiert wurde. Der schwere Spiegel macht die beiden Wege ununterscheidbar, und man beobachtet Interferenz. In dieser Hinsicht ist das Heidelberger Experiment eine moderne Realisierung von Einsteins Gedankenexperiment.

Eine Frage an unser Weltbild

Wie sich zeigt, ist die Bedeutung von »Ununterscheidbarkeit« einer der wichtigsten Unterschiede zwischen Quantenphysik und klassischer Physik: Immer wenn es prinzipiell unmöglich ist, zwischen gleichberechtigten Alternativen zu unterscheiden, müssen wir die zugehörige Wellenfunktion als Superposition all dieser Möglichkeiten aufschreiben. Das ist nicht nur ein mathematischer Trick, sondern hat tatsächlich messbare und durchaus verblüffende Konsequenzen.

Aber wie verstehen wir die Quanteninterferenz von Atom, Licht oder Molekül, bei der Orte oder Bewegungsrichtungen, die einander klassisch ausschließen, anscheinend gleichzeitig realisiert sind?

Das quantenmechanische Superpositionsprinzip verletzt offensichtlich mindestens einen unserer naiven Alltagsbegriffe von Realität, Raum oder Zeit, wie sie umgangssprachlich verwendet werden. Die Experimente in Heidelberg und Wien zeigen einmal mehr, dass wir eine Neuinterpretation wenigstens eines der drei Begriffe brauchen, wenn wir unsere Welt richtig verstehen wollen. ~

DIE AUTOREN

Markus Arndt (links) ist Professor für Quantennanophysik an der Universität Wien. **Jörg Schmiedmayer** (Mitte) ist Professor für Quantenphysik an der Technischen Universität (TU) Wien und leitet das Atominstitut der TU Wien. Beide forschen am Vienna Center for Quantum Science and Technology (VCQ). **Markus Oberthaler** ist als Professor am Kirchhoff-Institut für Physik der Universität Heidelberg tätig.

QUELLEN

Englert, B.-G. et al.: Komplementarität und Welle-Teilchen-Dualismus. In: Spektrum der Wissenschaft 2/1995, S. 50–55
Gerlich, S. et al.: Quantum Interference of Large Organic Molecules. In: Nature Communications 2, Artikel 263, 2011
Morsch, O.: Atominterferometrie mit verschränkten Teilchen. In: Spektrum der Wissenschaft 7/2010, S. 16–20
Tomkovič, J. et al.: Single Spontaneous Photon as a Coherent Beamsplitter for an Atomic Matter-Wave. In: Nature Physics 7, S. 379–382, 2011

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1130108**

nature video

Strands of life

5 short films on physiology and medicine

View the films on iTunes, the *Nature Video* YouTube channel and at www.nature.com/lindau/2011*

Recorded at the 2011 Meeting of Nobel Laureates in Lindau, the films capture conversations between young researchers and Nobel prizewinning scientists Harald zur Hausen, Edmond Fisher, Ferid Murad, Elizabeth Blackburn and Oliver Smithies. As well as discussing some of the world's greatest health challenges, the laureates offer advice on grant writing, choosing a career path and forming successful scientific partnerships.

Download the free app for your phone: http://gettag.mobi

*Published weekly from the 15th Sept - 13th Oct 2011

Supported by:

MARS

MEETINGS OF NOBEL LAUREATES LINDAU

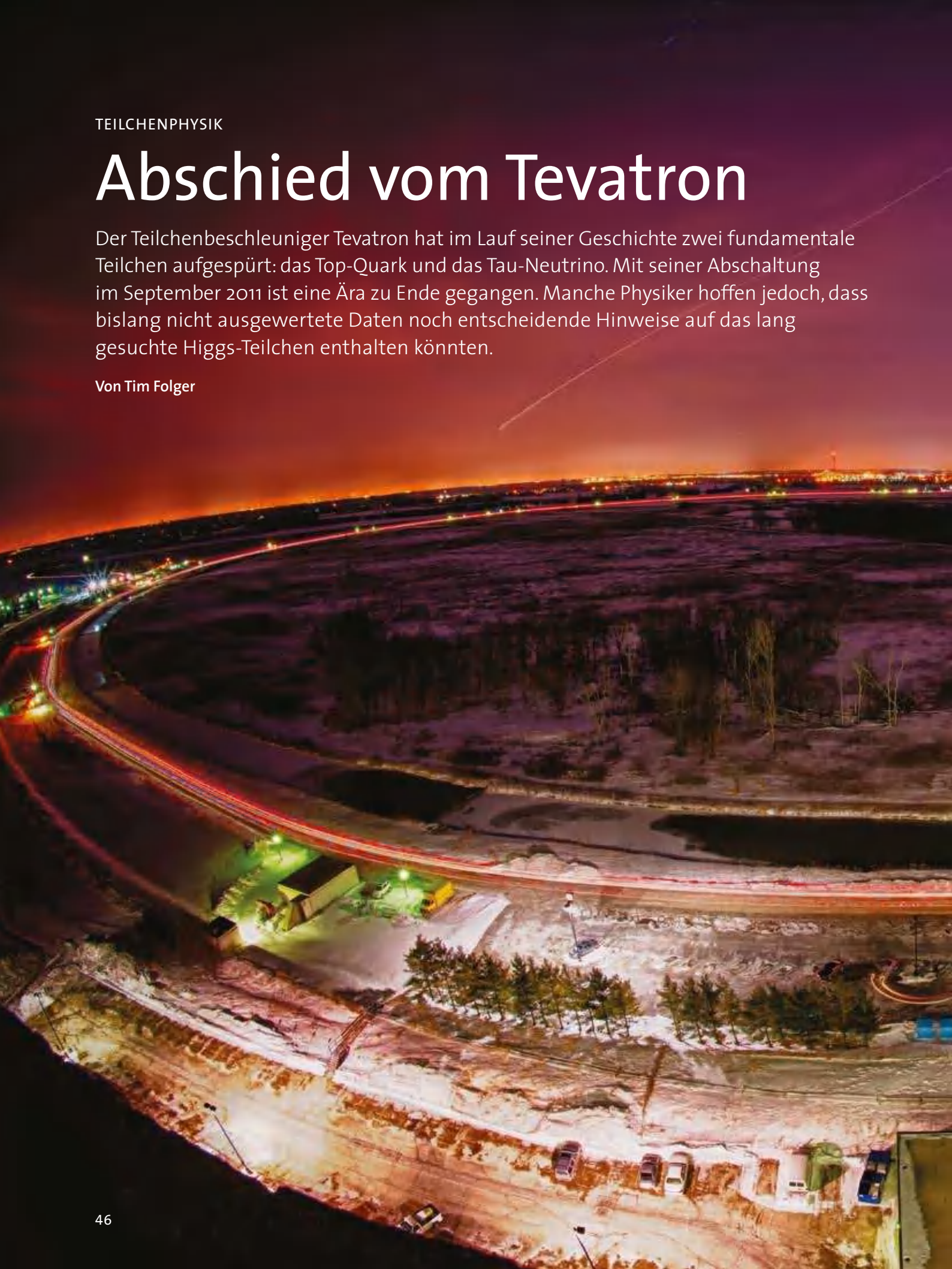
nature publishing group npg

TEILCHENPHYSIK

Abschied vom Tevatron

Der Teilchenbeschleuniger Tevatron hat im Lauf seiner Geschichte zwei fundamentale Teilchen aufgespürt: das Top-Quark und das Tau-Neutrino. Mit seiner Abschaltung im September 2011 ist eine Ära zu Ende gegangen. Manche Physiker hoffen jedoch, dass bislang nicht ausgewertete Daten noch entscheidende Hinweise auf das lang gesuchte Higgs-Teilchen enthalten könnten.

Von Tim Folger



Gelegentlich sieht man hier eine kleine Herde Büffel grasen – es ist einer der letzten Flecken Prärie im US-Bundesstaat Illinois. Tief unter der Erdoberfläche rasten jahrzehntelang Protonen und Antiprotonen in entgegengesetzter Richtung durch einen über 22 Kilometer langen Tunnel. Sekündlich stießen Hunderttausende von ihnen zusammen und erzeugten dabei ganze Schauer von Elementarteilchen.

Dank dieser Kollisionen hat der Teilchenbeschleuniger auf dem 28 Quadratkilometer großen Gelände des Fermi National Accelerator Laboratory in Batavia, 80 Kilometer westlich von Chicago, Geschichte gemacht. Denn dabei entdeckten Physiker unter anderem zwei der 17 fundamentalen Teilchen, aus denen die Materie im Universum besteht. Weitere spektakuläre Ereignisse wird das Tevatron aber wohl nicht mehr vermelden. Am 30. September 2011 schalteten die Ingenieure die Energieversorgung für die mehr als 1000 heliumgekühlten, supraleitenden Magnete ab. Als der letzte schwache Teilchenstrom in ein Stück Metall drang und absorbiert wurde, endete der rund 28 Jahre währende Betrieb des Be-

Nacht bricht über dem Tevatron herein. Der Teilchenbeschleuniger am Fermilab bei Chicago mit seinem Umfang von 22 Kilometern diente Hochenergiephysikern rund 28 Jahre lang als Fenster in das subatomare Universum.

FERMILAB / REIDAR HAHN

schleunigers. Bis vor Kurzem war er die unangefochtene Nummer eins auf seinem Gebiet.

Nahezu zwei Jahrzehnte hatten hier einige hundert Physiker aus rund einem Dutzend Länder unter anderem damit verbracht, nach einem bislang hypothetischen Teilchen zu suchen, dem so genannten Higgs-Boson. Nun hat der Schauplatz dieser Jagd – mit der immer auch die Chance auf einen Nobelpreis verbunden ist – gewechselt. Sie findet an einem neuen, noch stärkeren Beschleuniger statt: dem Large Hadron Collider (LHC) am europäischen Teilchenforschungszentrum CERN bei Genf. Der Umfang seines Beschleunigertunnels von 27 Kilometern und die darin erreichbaren Energien werden bis weit in das nächste Jahrzehnt hinein die Weltspitze in der Teilchenforschung markieren (siehe zuletzt »Die Jagd nach dem Quark-Gluon-Plasma«, SdW 5/2011, S. 86).

> »Die Geschichte der Wissenschaft ist die Geschichte neuer Werkzeuge«
>
> *Dmitri Denisov, Wissenschaftler am Tevatron*

Die Entscheidung des US-Energieministeriums (Department of Energy, DOE), das Tevatron am Ende des Wirtschaftsjahrs abzuschalten, hatte niemanden am Fermilab überrascht. Wohl hatten einige Physiker empfohlen, den alternden Beschleuniger für weitere drei Jahre zu finanzieren; auf diese Weise sollte die Anlage eine letzte Chance erhalten, das Higgs zu finden – ein Teilchen, von dem Theoretiker glauben, dass es für die Masse aller anderen Elementarteilchen verantwortlich ist.

Doch selbst die leidenschaftlichsten Verfechter des Tevatrons geben zu, dass die Maschine inzwischen entbehrlich ist. Es sei wie bei einem alten Auto, dessen Zeit eines Tages abgelaufen ist, sagt Dmitri Denisov: »Die Geschichte der Wissenschaft ist die Geschichte neuer Werkzeuge. Und nachdem wir dieses hier mehr als 25 Jahre lang benutzt haben, gibt es nun ein besseres.« Das zu sagen fällt ihm allerdings nicht leicht. Denisov war einer der Sprecher des D-Zero-Teams, das die Verantwortung für einen der beiden großen Detektoren am Tevatron trug. (Der Name D-Zero bezieht sich auf ein bei der Messung verwendetes Koordinatensystem.) Noch Anfang 2009 hatte der Physiker auf einer Pressekonferenz anlässlich der Jahrestagung der US-Wissenschaftsgesellschaft AAAS (American Association for the Advancement of Science) erklärt: »Unsere Chancen, das Higgs zu entdecken, bevor man es am LHC findet, sind jetzt sehr, sehr gut.« Denn damals, im September 2008, hatten technische Probleme dazu geführt, dass der LHC unmittelbar nach Aufnahme seines Betriebs wieder abgeschaltet werden musste. Viele Forscher am Fermilab teilten Denisovs Optimismus. Doch der Erfolg blieb aus. Als der LHC im November 2009 den Betrieb erneut aufnahm, steigerten die Ingenieure die Energie der darin kreisenden Teilchenstrahlen rasch auf das Dreifache dessen, was am Tevatron möglich war.

Zuvor hatte D-Zero vor allem mit dem zweiten großen Detektor am Tevatron gewetteifert, dem Collider Detector at Fermilab (CDF). Auch hier, in rund 1,5 Kilometer Entfernung von D-Zero, hatten Hunderte von Physikern gearbeitet. Die Konkurrenz zwischen den Detektorenteams war beträchtlich. »Ich möchte Dmitri besiegen – und er mich«, gab Rob Roser, der Leiter des CDF-Teams, noch vor einigen Monaten zu. »Wir reden miteinander und sind Kollegen und Freunde. Dennoch wollte jeder von uns den Kampf für sich entscheiden. In der Endphase hat sich das aber verändert. Während vorher Dmitri der Böse war, war es dann der LHC. Es ist wie bei Geschwistern: Du darfst meinen kleinen Bruder nicht schlagen, das darf nur ich.«

Auf den neuen Beschleuniger haben die Physiker weltweit lange gewartet (siehe »Weltbild vor dem Umbruch«, SdW 11/2008, S. 12). Es mangelt der Forschergemeinde nicht an Ideen, was der LHC, während er in den kommenden Jahren die Kollisionsenergie bis zum Maximalwert von sieben Teraelektronvolt pro Teilchenstrahl steigern wird, alles entdecken könnte: zusätzliche Raumdimensionen, die Supersymmetrie (dann besäße jedes der bekannten Teilchen einen noch unentdeckten, so genannten supersymmetrischen Zwilling) und natürlich das Higgs-Boson. Am besten wäre etwas, womit keiner gerechnet hat.

Allerdings kann auch noch etwas ganz anderes geschehen. Was wäre, wenn der LHC ebenso wie die Teilchenexperimente, die künftig am Fermilab stattfinden sollen, absolut nichts findet, was die Forscher auf neue Wege führen könnte?

Schließlich ist es noch gar nicht lange her, da hegten die Physiker ganz ähnliche Hoffnungen wie heute. Schon 15 Jahre vor der LHC-Inbetriebnahme glaubten die Forscher am Fermilab, sie würden nun das Higgs-Teilchen nachweisen können, Belege für die Supersymmetrie finden, die Natur der Dunklen Materie entschlüsseln und vieles mehr. Die Entdeckung des Higgs-Bosons hätte ihnen nicht nur den Nobelpreis eingebracht, sondern auch den krönenden Abschluss einer herausragenden Ära der Physik bedeutet. Das Higgs ist das letzte fehlende Puzzlestück des Standardmodells, eines komplexen theoretischen Bauwerks, das fast das gesamte Universum mit Hilfe der Wechselwirkungen von 17 funda-

AUF EINEN BLICK

ENDE EINER ÄRA

1 Das **Tevatron** des bei Chicago gelegenen Wissenschaftszentrums Fermilab war bis zur Inbetriebnahme des **Large Hadron Collider** (LHC) der mächtigste Teilchenbeschleuniger der Welt. Hier wurden zwei der 17 fundamentalen Teilchen nachgewiesen, aus denen unsere Welt besteht: das Top-Quark und das Tau-Neutrino.

2 Auch nach seiner Stilllegung am 30. September 2011 werten die am Tevatron tätigen Physiker weiterhin Daten aus – in der Hoffnung, doch noch Hinweise auf das lange gesuchte **Higgs-Boson** zu entdecken.

3 Bis 2020 soll am Fermilab »Projekt X« entstehen: ein neuer, kleiner Beschleuniger, an dem sich die Technik für einen noch leistungsfähigen LHC-Nachfolger testen lässt.

mentalen Teilchen beschreibt. Es vereinigt die starke Kraft, die für die Bindung der Nukleonen im Atomkern sorgt, die schwache Wechselwirkung, die für Teilchenzerfälle verantwortlich ist, und die elektromagnetische Kraft. Nur die vierte Fundamentalkraft, die Gravitation, wird nicht vom Standardmodell erfasst. Doch seit die Theoretiker vor 40 Jahren die letzten Verfeinerungen am Standardmodell vorgenommen haben, bestätigten Experimente jede einzelne seiner Vorhersagen.

Der größte Triumph des Tevatrons – damals gewannen das CDF- und das D-Zero-Team das Wettrennen mit dem Super-Proton-Synchrotron am CERN, das heute als Vorbeschleuniger für den LHC verwendet wird – bestand in der Entdeckung des Top-Quarks im Jahr 1995. Die Existenz dieses Elementarteilchens, das sehr große Masse besitzt, war schon 1973 vorhergesagt worden. Mit seinem Nachweis bestätigte sich das Standardmodell als extrem präzise Beschreibung des Universums – zumindest in den damals erreichbaren Energiebereichen.

»Wir glaubten, die Nuss knacken zu können«

Nach einer fünfjährigen Phase technischer Neuerungen legte der damals weltbeste Beschleuniger im Jahr 2001 noch einmal zu. Die Physiker hofften nun, mit dem Tevatron nicht nur das Higgs-Teilchen aufzuspüren, sondern auch auf völlig neue Phänomene zu stoßen. Denn trotz aller Vorhersagekraft liefert das Standardmodell keine vollständige Beschreibung der Natur. Zu seinen Mängeln gehört neben der fehlenden Einbeziehung der Gravitation, dass es nicht erklärt, worum es sich bei der Dunklen Materie handelt. Diese noch nicht direkt nachgewiesene Materieform beeinflusst zwar wohl die Bewegungen von Sternen in Galaxien, scheint aber sonst nicht mit gewöhnlicher Materie in Wechselwirkung zu treten. Auch für die Dunkle Energie liefert das Standardmodell keine Erklärung. Das noch vollkommen rätselhafte Phänomen soll die Expansion des Weltalls beschleunigen (siehe »Das Universum startet durch«, SdW 12/2011, S. 12).

Doch an dieser Herausforderung scheiterte der Beschleuniger. »Vor zehn Jahren glaubten wir, die Nuss knacken zu können, aber das ist nicht gelungen«, stellt Bob Tschirhart fest, ein theoretischer Physiker am Fermilab: »Es gibt da draußen eine Realitätsebene, bis zu der wir immer noch nicht vorgedrungen sind.«

Sein Vermächtnis besteht nun wohl darin, den spektakulären, endgültigen Nachweis für das Funktionieren des Standardmodells erbracht zu haben. Das ist kein geringer Erfolg. Aber eigentlich hatte man mehr erwartet. »Wir sollten natürlich das Higgs finden«, sagt Stephen Mrenna, ein Computerphysiker, der Mitte der 1990er Jahre zum Fermilab kam, »und auch die Supersymmetrie, wenn sie denn existiert.«

Jetzt hoffen die Physiker, dass der LHC dort erfolgreich ist, wo das Tevatron aufgeben musste. Er soll neue Gebiete der Physik erschließen und Hinweise darauf liefern, wie der Nachfolger des Standardmodells aussehen könnte. Wie die meisten seiner Kollegen glaubt auch Mrenna, dass der LHC

Meilensteine – drei Jahrzehnte voller Entdeckungen

Im Grunde reichen zwei Zahlen aus, um zu beschreiben, was man über einen Teilchenbeschleuniger wissen muss. Zum einen die Energie der Teilchenstrahlen – mit höheren Energien können die Physiker massereichere Teilchen hervorzaubern. Zum anderen die Intensität beziehungsweise die Anzahl der Kollisionen, die pro Sekunde in den Detektoren stattfinden. Im ersten Jahrzehnt setzten die Ingenieure am Tevatron alles daran, die Energie zu erhöhen. Danach bemühten sie sich vor allem, die Zahl der Kollisionen zu steigern.

5. Juli 1979
Das US-Energieministerium erteilt dem Fermilab die Genehmigung, einen supraleitenden Beschleuniger zu bauen. Er wird später Tevatron getauft.

1. Oktober 1983
Beginn der Experimente. Zunächst trifft ein einzelner Teilchenstrahl auf eine feste Probe.

13. Oktober 1985
Ein Strahl aus Antiprotonen kollidiert mit Protonen. Der Detektor CDF beobachtet die ersten Proton-Antiproton-Kollisionen bei 1,6 Teraelektronvolt (Billionen Elektronvolt, TeV).

31. August 1992
Die Kollisionsenergie wird auf 1,8 TeV erhöht. Nun beginnt eine lange Periode von Kollisionsexperimenten.

20. Juli 2000

Das DONuT-Experiment liefert erste Hinweise auf eine direkte Beobachtung des Tau-Neutrinos.

4. August 2008
Wissenschaftler des Tevatrons geben bekannt, dass das Higgs-Boson nicht über eine Masse von 170 GeV verfügt. Das Ergebnis zeigt vor allem, dass das Tevatron im Prinzip in der Lage ist, das Teilchen zu entdecken.

Weltrekord: Das Tevatron beschleunigt Protonen auf eine Energie von 512 Gigaelektronvolt (Milliarden Elektronvolt, GeV).

3. Juli 1983

ALLE FOTOS: MIT FRDL. GEN. DES FERMILAB

Die Wissenschaftler der Detektoren CDF und D-Zero geben die Entdeckung des Top-Quarks bekannt.

3. März 1995

1. März 2001
Durch technische Verbesserungen ist die Energie des Teilchenstrahls auf bis zu 2 TeV erhöht worden. Im Verlauf der nächsten Dekade wird die so genannte Luminosität des Beschleunigers auf mehr als das Vierfache gesteigert. Dadurch können Forscher mehr Kollisionsereignisse registrieren.

Im Tevatron finden die letzten Kollisionen statt; dann wird es stillgelegt. Die Analyse der Daten wird noch Jahre in Anspruch nehmen.

30. September 2011

Das Wettrennen gegen den LHC

Von Geoff Brumfiel

Das Tevatron wurde abgeschaltet, aber die Jagd nach dem Higgs-Boson, dem am schwersten fassbaren Teilchen des Standardmodells der Teilchenphysik, geht weiter. In den nächsten Monaten sollten die Daten des Beschleunigers am US-amerikanischen Fermilab sowie vom Large Hadron Collider am europäischen Forschungszentrum CERN beantworten, was ein Physiker als »Shakespeares Frage« bezeichnete: Sein oder Nichtsein – was gilt für das Higgs-Teilchen?

Bereits vor nahezu einem halben Jahrhundert sagten Wissenschaftler die Existenz des Higgs-Bosons voraus. Es gilt als verantwortlich dafür, dass alle anderen Teilchen eine Masse besitzen. Aber aus Sicht der Physiker ist das Higgs-Boson vor allem deshalb von besonderer Bedeutung, weil es zur Vereinigung von Kräften führt. Es erlaubt ihnen, die elektromagnetische Kraft mit der schwachen Wechselwirkung zu einer so genannten elektroschwachen Kraft zusammenzuführen.

Das kann das Higgs-Boson aber nur leisten, wenn seine Masse zwischen 100 und 1000 Milliarden Elektronvolt (GeV) liegt. Innerhalb dieses Bereichs konzentrieren sich LHC und Tevatron auf die wahrscheinlichsten Werte. Im Juli gaben Tevatron-Forscher auf einer Fachtagung in Grenoble bekannt, dass die Masse des Higgs nicht im Bereich von 156 bis 177 GeV liegt. Der LHC wiederum konnte bereits zahlreiche Wertebereiche zwischen 150 und 450 GeV ausschließen.

Die meisten Physiker glauben, dass sich das Higgs-Boson – falls es existiert – wahrscheinlich zwischen 115 und 140 GeV verbirgt. Das wäre allerdings problematisch. Ein derart leichtes Higgs-Teilchen würde nämlich häufig in gewöhnliche Partikel zerfallen. Die wiederum lassen sich nur mit Mühe von den vielen anderen Kollisionstrümmern unterscheiden. Möglicherweise haben die Forscher ja sogar schon ein paar Higgs-Zerfälle gesehen. Aber um sie wirklich zu identifizieren, ist die vielfache Menge der bislang produzierten Daten nötig.

Auch nach seiner Abschaltung trägt das Tevatron noch mit bislang unausgewerteten Daten zu der Suche bei. Die Aufgabe, die Entdeckung endgültig zu bestätigen, wird jedoch so oder so dem LHC zufallen. Hinweise könnten dort schon in den nächsten Monaten auftauchen. Es wird in jedem Fall bis Ende 2012 dauern, bis die Physiker sicher sagen können, ob es das Higgs-Boson gibt oder nicht. Bis dahin hat der LHC 50 Petabyte (50 Millionen Gigabyte) an Daten gesammelt. Das entspricht dem Zehnmilliardenfachen der Datenmenge, die in den gesammelten Werken von Shakespeare enthalten ist.

Geoff Brumfiel ist Reporter für das Fachmagazin »Nature«.

das Higgs-Boson schnell findet. »Ich würde wetten – das passiert spätestens 2012«, sagt der Forscher. »Wenn nicht, kann ich mir gut vorstellen, dass wir gar nichts finden.«

Genau hier liegt nämlich das Problem, das die Erkundung neuen Terrains mit sich bringt: Vielleicht gibt es da draußen überhaupt nichts Neues. Einige Physiker spekulieren über die Existenz einer »Energiewüste« zwischen dem Energiebereich, den sie in den nächsten Jahren untersuchen können, und jenen noch viel höheren Energien, bei denen dann vielleicht tatsächlich eine neue Physik zu Tage tritt. Der LHC bietet keinerlei Garantie, dass Physiker mit ihm Neuland betreten. Das richtige Werkzeug dafür wäre vielleicht der Superconducting Supercollider (SSC) gewesen. Gegen diese Maschine, deren Beschleunigertunnel einen Umfang von 87 Kilometern aufweisen sollte, hätte sich der LHC wie ein Zwerg ausgenommen. Der SSC war für Teilchenstrahlen mit nahezu der dreifachen Energie ausgelegt, und in der Nähe der kleinen texanischen Stadt Waxahachie war 1991 sogar bereits mit dem Bau begonnen worden. Kostensteigerungen veranlassten den US-Kongress allerdings zwei Jahre später, das Projekt zu streichen. »Der SSC war von Anfang an für einen Energiebereich entworfen, in dem wir sicher waren, etwas Neues zu finden«, sagt Mrenna. »Der LHC ist ein billiger Cousin. Aber immerhin haben wir ihn.«

Die Menschen wollen wissen, wie das Universum funktioniert

Schafft es der LHC allerdings nicht, das Higgs-Boson zu finden oder eine andere bahnbrechende Entdeckung zu machen, dann, so Mrenna, wird es für die Physiker schwierig, die Kosten für einen noch größeren Beschleuniger zu rechtfertigen. »Man könnte fragen, was die Suche nach dem Higgs-Teilchen mit der Wirtschaftslage, mit dem Krieg gegen den Terrorismus oder mit was immer sonst zu tun hat«, stellt der Forscher fest. »Im Augenblick argumentieren wir, dass jeder von neuem Wissen profitiert und die Menschen einfach wissen wollen, wie das Universum funktioniert. Außerdem bilden wir viele Leute aus. Und wenn man die klügsten Menschen vor ein wirklich schweres Problem stellt, entstehen üblicherweise nützliche Nebenprodukte. Die Physik selbst wird ab einem gewissen Punkt aber immer weniger relevant.« Mit anderen Worten: Existiert die Energiewüste wirklich, bringen Politik und Gesellschaft vielleicht nicht den Willen auf, die Durststrecke zu überwinden.

Den ersten Teilchenbeschleuniger baute Ernest Lawrence, Physiker der University of California in Berkeley, im Jahr 1929. Sein »Protonen-Karussell«, wie er es nannte, hatte einen Durchmesser von 12,7 Zentimetern, war aus Bronze, Siegelwachs und Glas hergestellt und kostete wahrscheinlich um die 25 Dollar. Auf der Rechnung für den LHC stehen hingegen schon einige Milliarden Euro. Sein Bau war ein internationaler Kraftakt, und die Ausmaße seines Tunnels würden reichen, eine Kleinstadt zu umfassen. Doch selbst wenn er zu einem großartigen Erfolg wird, bestehen kaum Aussichten, dass in der näheren Zukunft ein vergleichbarer Entwicklungs-

FERMILAB

Dieses Luftbild zeigt das Tevatron im US-Bundesstaat Illinois als zentralen Ring. Mit dem kleineren Speicherring (unten links) betreiben die Forscher derzeit Neutrinophysik. Sie feuern die mit seiner Hilfe erzeugten Teilchen durch die Erdkruste hindurch zu einem unterirdischen Detektor in der 725 Kilometer nordwestlich gelegenen Soudan-Mine im benachbarten Minnesota. So wollen sie herausfinden, ob sich die Teilchen während des Flugs in andere Neutrinoarten umwandeln.

sprung stattfindet. »Wir wissen zwar, wie wir zehnmal höhere Energien erreichen können – aber das würde auch zehnmal mehr kosten«, sagt Pier Oddone, der Direktor des Fermilabs.

Tatsache ist: Das Zentrum der Teilchenphysik hat sich nun nach Europa verschoben, und das Fermilab muss sich neu orientieren. »In einer idealen Welt hätten wir das Tevatron weiterlaufen lassen, ohne deshalb andere Projekte zu stoppen«, sagt der Forscher, »aber dafür reichte das Geld nicht.« Gegenwärtig laufen Experimente zur Neutrinophysik. Dazu schießen die Forscher die Teilchen von einer Quelle am Fermilab durch die Erdkruste hindurch zu einem Detektor in einem 725 Kilometer entfernten Minenschacht in Minnesota (vergleiche »Verwandlung im Untergrund« auf S. 16). So könnten sie Neues über diese wohl am wenigsten verstandenen Elementarteilchen herausfinden. Außerdem beteiligen sich Forscher am Dark Energy Survey, einer Himmelsdurchmusterung zur Untersuchung der Dunklen Energie.

Doch das vorrangige Ziel des Instituts bleibt es, irgendwann wieder den mächtigsten Teilchenbeschleuniger der Welt zu beherbergen. Auf dem Weg dorthin will Oddone bis 2020 einen Beschleuniger namens »Projekt X« fertig stellen, eine anderthalb Kilometer lange Maschine. Sie soll zunächst Neutrinos und andere Teilchen für Experimente am Fermilab erzeugen, langfristig aber als Prüfstand für Techniken dienen, die eines Tages den Bau eines LHC-Nachfolgers zu einem bezahlbaren Preis ermöglichen. »Projekt X ist eine Brücke, auf der wir zurück an die Hochenergiefront der Physik wollen«, sagt Steve Holmes, der Manager des Vorhabens. »Dieses Gebiet ist schließlich das grundlegendste Arbeitsgebiet der Physik, und die USA standen darin 70 Jahre lang an der Spitze.«

Aber auch das Tevatron selbst könnte noch für Nachrichten sorgen. Denisov, Roser und ihre Kollegen werden sich bis mindestens 2013 mit der Auswertung der Daten beschäftigen. Das gewaltige Datenarchiv könnte auch helfen, die anfänglichen Entdeckungen des LHC zu untermauern. Und vielleicht sind ja doch noch überraschende neue Ergebnisse auf irgendeiner Festplatte verborgen und warten nur darauf, analysiert zu werden. Im vergangenen Frühjahr zum Beispiel sah es kurzzeitig so aus, als hätte das Tevatron uns einen ersten Blick auf die Physik jenseits des Standardmodells erlaubt. Rosers CDF-Team verkündete im April, dass es vorbehaltlich weiterer Prüfungen Hinweise auf ein neues Teilchen oder eine neue Kraft in den Daten des CDF gefunden hätte. In einer kleinen, aber statistisch signifikanten Zahl von Fällen war eine kleine Delle in den Daten zu sehen, ein Überschuss an Teilchen relativ zu den Vorhersagen des Standardmodells. Die Teilchen schienen das Zerfallsprodukt eines massereicheren Partikels zu sein, vielleicht eine unerwartete Form des Higgs-Bosons.

Ende Mai hatte das Team die Daten noch einmal analysiert. »Die Delle ist immer noch da«, erklärte Roser damals. Doch zwei Wochen später gab Rosers Kollege und Rivale Denisov die Ergebnisse einer unabhängigen Analyse der CDF-Daten durch das D-Zero-Team bekannt. »Wir haben nichts gefunden«, erklärte er auf einer Pressekonferenz. Schließlich war es wie so oft in den vergangenen 30 Jahren: Der Aufbruch in eine neue Ära der Physik musste wieder einmal vertagt werden. Der Nachweis des Higgs-Teilchens wäre ein großartiger Abgang für das Tevatron gewesen. Nun muss sich zeigen, ob der LHC es besser kann. ~

DER AUTOR

Tim Folger ist preisgekrönter Wissenschaftsjournalist und Herausgeber der jährlich im Verlag Houghton Mifflin erscheinenden Anthologie »The Best American Science and Nature Writing«.

QUELLEN

Hoddeson, L. et al.: Fermilab: Physics, the Frontier, and Megascience. University of Chicago Press, 2008
Sample, I.: Massive: The Missing Particle That Sparked the Greatest Hunt in Science. Basic Books, New York 2010

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1130109**

Temperierende Atemluft

Durch Darüberblasen lassen sich Dinge sowohl erwärmen als auch abkühlen. Wie das?

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

> Was? ... du bläsest aus einem Munde warm und kalt?
> Geh, mit dir mag ich nichts zu tun haben!
>
> *Aesop (um 600 v. Chr.)*

In der aesopschen Fabel vom Mann und dem Satyr, zitiert nach Lessing, heißt es: »Der Mann bläset in seine kalte Hand, um seine Hand zu wärmen; und bläset in seinen heißen Brei, um seinen Brei zu kühlen. Was? sagt der Satyr; du bläsest aus einem Munde warm und kalt? Geh, mit dir mag ich nichts zu tun haben!«

Es ist allgemein bekannt, dass wir mit warmer Atemluft unsere frierenden Hände wieder auf erträgliche Temperaturen bringen können. Hingegen wird die Behauptung, man könne heiße Flüssigkeiten durch Blasen kühlen, weit weniger akzeptiert; zumindest hält man diese Methode nicht für besonders effektiv. Manch einer sieht in ihr sogar nur ein Ritual, lediglich dazu bestimmt, das Warten auf die von selbst ablaufende Abkühlung zu verkürzen.

Aus Erfahrung wissen wir, dass der Energiegehalt von warmer Luft nicht besonders groß ist. In der Sauna ertragen wir ohne größere Schwierigkeiten Lufttemperaturen von 90 Grad Celsius, während ein Bad in genauso heißem Wasser undenkbar ist. Lässt uns vielleicht dieser große Unterschied zwischen der Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit von Luft gegenüber denen von Wasser unterbewusst an der Wirkung des Blasens zweifeln?

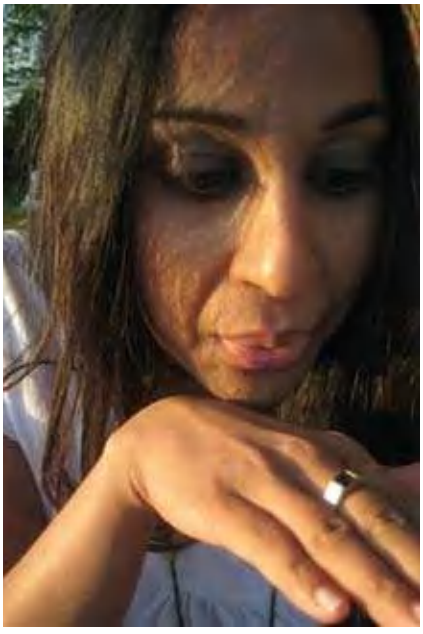
Die Energie steckt im Wasserdampf

Andererseits kennen wir den ganz alltäglichen Fall, dass ein feuchter Handrücken plötzlich abkühlt, wenn wir, am besten flach, darüberpusten. Und das trotz der Wärme unserer Atemluft! Feuchtet man die Hand mit Parfüm oder Alkohol an, genügt sogar leichtes Hin- und Herschwenken, um die Abkühlung zu spüren. Hängt das vielleicht mit der Verdunstung zusammen? Tatsächlich verdunstet Alkohol viel schneller als Wasser. Dafür muss er der Umgebung aber auch mehr Energie entziehen – in diesem Fall vor allem dem Handrücken. Denn aus der Luft ist, siehe oben, angesichts ihrer geringen Wärmekapazität nur wenig zu holen.

Bei einem Glas heißen Tees, der allmählich verdunstet, ist es ähnlich. Der aufsteigende heiße Wasserdampf trägt einen verhältnismäßig großen Teil der Energie mit sich fort. Er enthält nämlich neben der thermischen Energie, die ihm durch Erhitzung des Wassers auf 100 Grad Celsius zugeführt wurde, noch die Verdampfungsenergie, die für seinen Übergang von der flüssigen in die Gasphase aufgewendet wurde. Wie man sich leicht überlegen kann, ist ihr Beitrag ganz erheblich. Schließlich bleibt die Temperatur des Wassers beim Sieden konstant bei 100 Grad, so dass der anhaltende Energiestrom ausschließlich der Verdampfung dient. Und da es wesentlich länger dauert, Wasser verdampfen zu lassen, als es zum Sieden zu bringen, muss die Verdampfungsenergie entsprechend größer sein.

Das lehrt aber auch die Erfahrung. Wie wir wissen, kann selbst kurzzeitiger Kontakt mit heißem Wasserdampf – mehr noch als der Kontakt mit kochend heißem Wasser! – zu starken Verbrühungen führen. Denn dann gibt das kondensierende Wasser neben seiner thermischen Energie auch die wieder frei werdende Verdampfungsenergie ab.

ALLE FOTOS: H.-J. SCHLICHTING



Obwohl Atemluft warm ist, kühlt ein angefeuchteter Handrücken ab, wenn man über ihn hinwegbläst (links). Denn das verdunstende Wasser entzieht ihm Energie. Auch Tee kühlt ab, weil ein Teil des Teewassers verdunstet. Bläst man die wasserdampfgesättigte Schicht über der Tasse weg (oben), beschleunigt sich der Vorgang, weil die Verdunstungsrate steigt.

Der über einer Tasse heißen Tees aufsteigende Dampf trägt Verdampfungsenergie mit sich fort. Ein Teil davon kondensiert aber gleich wieder zu winzigen Tröpfchen, die durch Lichtstreuung als Nebelschwaden sichtbar werden.

Der über dem Tee aufsteigende Wasserdampf entschwindet nicht vollständig. Vielmehr kondensiert ein Teil davon sofort wieder zu Nebelschwaden, wenn er in Kontakt mit der kalten Luft gerät. Über dem Tee bildet sich so eine weit gehend feuchtigkeitsgesättigte Schicht, welche die Verdunstungsrate stark verringert. Bläst man die Dampf- und Nebelfahnen weg, steigt die Rate wieder – und damit kühlt auch der Tee schneller ab.

Blasen wirkt also. Doch in welchem Maß? Um das herauszufinden, führten wir einige Freihandexperimente durch. Wir ließen dieselbe Menge heißen Wassers in derselben Umgebung und in gleichen Gläsern abkühlen, bliesen aber die Dampffahne über einem der Gläser kontinuierlich mit einem Haartrockner weg. Dann maßen wir mit einer empfindlichen Waage den Wasserverlust. Das Ergebnis: Nach zehn Minuten hatte das durch Blasen gekühlte Wasser einen um mehr als ein Drittel höheren Verlust an Masse gegenüber dem Vergleichsglas erfahren – es war mehr verdunstet. Auch die Temperatur hatte in ähnlichem Maß stärker abgenommen.

Die Luft spielt doch eine Rolle

Aus dem Verlust von Wasser berechneten wir den Anteil der Energieabnahme, der allein auf Grund der Verdunstung zu erwarten war. Multipliziert man die Massenabnahme mit der Energie, die für die Verdunstung von einem Gramm Wasser nötig ist, so erhält man die damit verbundene Energieabnahme. Aus dieser lässt sich unter der vereinfachenden Voraussetzung, dass die Energie dem heißen Wasser entzogen wurde, die Temperaturabnahme bestimmen.

Die so berechnete Temperaturabnahme war jeweils geringer als die tatsächlich gemessene. Dieses Ergebnis lässt den Schluss zu, dass die umgebende Luft eben doch einen merklichen Teil der Energie aufnimmt, und das offenbar umso mehr, je stärker wir durch Blasen dafür sorgen, dass die so erwärmte Luft immer wieder durch kühlere ersetzt wird. Das Blasen fördert folglich nicht nur die Verdunstung, sondern steigert auch den Wärmetransport zwischen heißem Wasser und Luft.

Im Alltag lässt sich die Verdunstungskühlung häufig beobachten. Wenn Menschen schwitzen, kühlt das auf der Haut verdunstende Wasser ihren Körper, und sie nutzen gern Ventilatoren, weil diese den Effekt steigern. Dass die Geräte Energie verbrauchen und das Zimmer dadurch leicht erwärmen, ist dabei vernachlässigbar. Und schon vor der Erfindung des Kühlschranks (der ebenfalls mit Verdunstungskühlung arbeitet) beschrieb der Naturdichter Adalbert Stifter, wie er seinen Wein temperiert. »Das Glas wird in ein Fach von sehr lockerem Stoffe gestellt, der Stoff mit einer sehr dünnen Flüssigkeit, die Äther heißt und die ich in einem Fläschchen immer mit führe, befeuchtet, welche Flüssigkeit sehr schnell und heftig verdünstet und dabei eine Kälte erzeugt, dass der Wein frischer wird, als wenn er eben von dem Keller käme, ja als ob er sogar in Eis stünde.«

Nicht nur »als ob«: Mit Ether kann man Wasser tatsächlich zum Gefrieren bringen. Bläst man über eine mit etwas Ether gefüllte flache Schale, die man auf eine kleine Wasserpfütze gestellt hat, so erstarrt diese und fixiert die Schale auf der Unterlage.

Die Physik, die dem Kaltblasen von Suppen und Tees zu Grunde liegt, wirkt auf mehr oder weniger unauffällige Weise. Schließlich ist der Wasserdampf praktisch unsichtbar, die verdunstende Wassermenge gering und der komplexe Zusammenhang zwischen Luftbewegung, Verdunstung und Wärmetransportvorgängen nicht so leicht zu durchschauen. Ihr Effekt ist jedoch nicht zu leugnen. Der Satyr hat aus seiner Beobachtung einen ganz falschen Schluss gezogen. ~

DER AUTOR

H. Joachim Schlichting war bis 2011 Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. 2008 erhielt er für seine didaktischen Konzepte den Pohl-Preis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.

QUELLEN

Lessing, G. E.: Vom Wesen der Fabel. In: Lessing: Werke 2, Wiesbaden o. J., S. 1115

Stifter, A.: Bergkristall und andere Erzählungen. Insel, Frankfurt am Main 1980, S. 74

LITERATURTIPP

Ucke, C., Schlichting, H. J.: Spiel, Physik und Spaß. Physik zum Mitdenken und Nachmachen. Wiley-VCH, Weinheim 2011
Zwei Experten für Physik-Spielzeug laden zum Mitmachen ein.

Vernunft und Glaube

Die Theologie reklamiert für sich rationales Denken und Wissenschaftlichkeit – trotz ihrer Bindung an die Religion. Dabei geht es ihr vor allem darum, innere Widersprüche zu beseitigen, aber auch um die Auseinandersetzung und Abstimmung mit anderen Disziplinen. Doch ist hier ein Konsens überhaupt möglich?

Von Christian Tapp

Die Vernunft »ist die höchste Hur, die der Teufel hat«. »Wer ... ein Christ sein will, der ... steche seiner Vernunft die Augen aus.« Keine Frage: Solche Äußerungen muss man vor ihrem historischen Hintergrund lesen, in diesem Fall der Reformationszeit. Und man sollte Martin Luthers Position nicht mit solchen polemischen Spitzen verwechseln. Aber sind solche Sprüche nicht typisch für eine verbreitete Einstellung im Verhältnis von Vernunft und Glaube? Häufig treffe ich auf diese Gegensätze: Entweder jemand ist rational, denkt nach und zweifelt, oder er glaubt eben einfach. Entweder einer ist modern und weltoffen, oder er verschanzt sich hinter traditionellen Riten und Ansichten. Entweder man kann als Philosoph radikal Fragen stellen, oder man ist »verkommen in der Verbrämung mythischer und theosophischer Metaphysik und Mystik« (Heidegger). Wie steht es wirklich um das Verhältnis von Glaube und Vernunft, von Religion und Wissenschaft?

Das Christentum hat in seiner Geschichte immer beide Tendenzen gekannt, hat sich mal der Vernunft geöffnet und sich dann wieder ängstlich vor ihr verschlossen. Schon Paulus schrieb der Gemeinde von Kolossai folgende Warnung ins Stammbuch: »Gebt Acht, dass euch niemand mit seiner Philosophie und falschen Lehre verführt, die sich nur auf menschliche Überlieferung stützen und sich auf die Elementarmächte der Welt, nicht auf Christus berufen« (Kolosser 2,8). Auf der anderen Seite hat kaum ein anderer biblischer Autor so sehr vernünftig für den Glauben argumentiert wie Paulus.

Die grundsätzlich positive Haltung zur Vernunft hat besonders in der katholischen Tradition stets dominiert. Doch gab es immer auch einen gewissen Argwohn gegenüber allzu kritischem Denken. Und das nicht ohne Grund: Denn dem Selbstverständnis der Christen zufolge ist der Glaube nichts, was man sich selbst gemacht hat, sondern ein Geschenk, das man durch eine lange Traditionskette hindurch aus Gnade erhalten hat.

Was aber heißt hier »der« Glaube? Schließlich ist es keineswegs deckungsgleich, was in kirchlichen Lehrtexten steht, in Predigten verkündet, im Religionsunterricht gelehrt oder von Christen tatsächlich geglaubt wird. Außerdem fallen im deutschen Wort »Glaube« zwei Aspekte zusammen, die etwa das Englische durch *faith* und *belief* auseinanderhält. Was also ist Glaube, und was macht sein Wesen aus? Das versucht die Fundamentaltheologie zu klären. Sie geht davon aus, dass Glaube etwas mit religiösen Überzeugungen zu tun hat, also mit bestimmten Inhalten, die für wahr gehalten werden; da-

AUF EINEN BLICK

THEOLOGIE ALS WISSENSCHAFT?

1 Der christliche Glaube ist von sich her der **Vernunft** verpflichtet: Einerseits betrifft er den ganzen Menschen, andererseits bezieht er sich auf einen Gott, der sich den Gläubigen als vernünftig geoffenbart hat, als ***logos***.

2 Der Glaube kann Widersprüche nicht einfach stehen lassen, sondern muss sie auflösen. Dazu dient eine kritische **Hermeneutik** von Texten der religiösen Tradition.

3 Der Anspruch der Theologie, Wissenschaft zu sein, ist umstritten. Allerdings erfüllt sie viele der allgemein akzeptierten **Kriterien von Wissenschaftlichkeit**. Dass es sie an Universitäten gibt, hat außerdem praktische Vorteile für unsere Gesellschaft.

neben aber auch mit Vertrauen und einer persönlich-existenziellen Antwort auf eine göttliche Offenbarung.

Der andere Bestandteil des Themas, die Vernunft, ist ein noch unbestimmterer Begriff. Meine These lautet: Vernunftfreundlichkeit gehört zum christlichen Glauben – und zwar seinem Selbstverständnis nach und nicht von außen aufgezwungen. Die leichte Zurückhaltung gegenüber »rein aus Vernunftgründen« vorgebrachter Kritik ändert daran nichts. Wie aber kann man von Vernunftfreundlichkeit sprechen, wo sich doch der Glaube so häufig in Widersprüche verstrickt: mit den Ergebnissen der Naturwissenschaften, mit den Vernunfterkenntnissen der Philosophie und sogar mit sich selbst?

Hier ein – unvollständiger – Katalog gängiger Widersprüche:

- Ist der Mensch ein paar Tage oder 13,7 Milliarden Jahre nach dem Anfang der Welt entstanden?
- Kann ein Toter nach drei Tagen wiederauferstehen, oder beginnen nicht schon Sekunden nach dem Tod die irreversiblen Zersetzungsprozesse?
- Hat Gott die Lebewesen erschaffen, oder sind sie Produkte eines ziellos-zufälligen Evolutionsprozesses?
- Dreht sich die Erde nicht doch um die Sonne, auch wenn Galilei dem abschwören musste?
- Sind wir Menschen, angeblich die »Krone der Schöpfung«, mitsamt unserem Planeten nicht ein kosmisches Randphänomen?
- Wie kann man von der Erlösung, der Wahrheit, der Botschaft für alle Menschen aller Zeiten sprechen – und noch dazu mit Bezug auf einen jüdischen Palästinenser, der vor 2000 Jahren lebte?
- Muss ein Katholik nicht glauben, dass alles, was der Papst sagt, wahr ist, obwohl wir alle wissen, dass der Papst ein Mensch ist, der denselben psychologischen Gesetzen und demselben »doxastischen Fallibilismus« (der Unabänderlichkeit, dass seine Meinungen gelegentlich falsch sind) unterworfen ist wie wir alle?
- Wie kann man angesichts des Leids in der Welt gleichzeitig von einem Gott behaupten, er sei allwissend, kenne also das Übel, er sei allgütig, wolle also stets das Beste, und allmächtig, könne es also auch jederzeit ändern?
- Wie kann man behaupten, dass es *einen* Gott gibt, und zugleich, dass Vater, Sohn und Heiliger Geist allesamt göttlich sind?

Solche Widersprüche erscheinen so drastisch, dass jeder Versuch, sie zu entkräften, den Verdacht erregt, ein bloßes Rückzugsgefecht darzustellen. Verliert man durch Heruminterpretieren nicht letztlich jeden Inhalt? Der britische Philosoph Antony Flew (1923–2010) hat das in seinem Buch »God and Philosophy« mit der Parabel vom unsichtbaren Gärtner ausgedrückt: Eine Waldlichtung sieht aus, als würde sie von einem Gärtner gepflegt. Man sieht aber keinen, also muss er unsichtbar sein; man hört keinen, also muss er nichthörbar sein; selbst die Bluthunde riechen ihn nicht. Die Frage ist dann: Was unterscheidet den angeblich unsichtbaren, nichthörbaren, geruchlosen, empirisch nicht fassbaren Gärtner eigentlich noch von gar keinem Gärtner?

Als Erstes ist in Bezug auf die Widersprüche eine Hermeneutik der traditionellen Glaubenstexte nötig, also eine angemessene Auslegung. Die Texte der Bibel oder der frühen Konzilien sind in einer ganz anderen Zeit als der unsrigen geschrieben worden, mit anderen Absichten und Zielen, mit

BEIDE STICHE: PUBLIC DOMAIN

Kirchenvater Augustinus (links) begründete die Sicht, das Übel habe kein eigenes Sein, sondern sei lediglich ein Mangel an Gutem. Gottfried Wilhelm Leibniz vertrat die These, Gott habe unter unendlich vielen »die beste aller möglichen Welten« geschaffen; jede Form des Übels sei letztlich notwendig und erklärbar.

einem anderen geistigen Horizont. Nur selten ist es ihre Hauptabsicht, von einem historischen Geschehen zu berichten. Meist gehören sie zu anderen literarischen Gattungen.

Und überhaupt: Wenn es in den biblischen Texten nur um historische Berichte ginge, wen (außer ein paar Historikern) würde das wirklich interessieren? Ob nun ein gewisser Jesus vor 2000 Jahren durch Galiläa oder durch Bethanien gelaufen ist; ob ein antiker Prophet dies oder jenes gesagt hat; ob irgendein Altorientale Träume hatte, seiner Ehefrau treu war oder sich doch eher mit der Dienstmagd vergnügt hat – das mag pikant und unterhaltsam sein, wäre aber letztlich irrelevant. Wie käme man dazu, eine Sammlung solcher Berichte als »Heilige Schrift« zu verehren oder in ihr gar ein Offenbarungszeugnis zu sehen? Warum hätten die Altvordern dafür Zeit und kostbares Schreibmaterial opfern sollen? Die historische Ebene der Texte ist zwar nicht unwichtig, denn schließlich beruft sich das Christentum auf eine wirkliche Geschichte Gottes mit seinem auserwählten Volk und auf die Person des Jesus von Nazareth. Aber diese Funktion der historischen Verankerung könnten grundsätzlich auch außerbiblische Quellen übernehmen.

Bibeltexte widerlegen keine Wissenschaft

Dass die Bibel eine Heilige Schrift ist, verdankt sie einer anderen Bedeutungsebene: den Aussagen über Gotteserfahrungen, über das Heil der Menschen und den Sinn der Welt. Augustinus (354–430) fand diejenigen Christen »kühn«, die versuchten, wissenschaftliche Erkenntnisse mit Bibelzitaten anzufechten. So etwas gefährde nur die Autorität der Bibel. In seinem Werk »Über den Wortlaut der Genesis« schreibt der Kirchenvater, die Heilige Schrift liefere keine Erklärung von Naturphänomenen, sondern wolle einen Heilsweg aufzeigen: »Oft genug kommt es vor, dass auch ein Nichtchrist ein ganz sicheres Wissen durch Vernunft und Erfahrung erworben hat, mit dem er etwas über die Erde und den Himmel, über Lauf und Umlauf, Größe und Abstand der Gestirne, über bestimmte Sonnen- und Mondfinsternisse, über die Umläufe der Jahre und Zeiten, über die Naturen der Lebewesen, Sträucher, Steine und dergleichen zu sagen hat. Nichts ist nun peinlicher, gefährlicher und am schärfsten zu verwerfen, als wenn ein Christ mit Berufung auf die christlichen Schriften zu einem Ungläubigen über diese Dinge Behauptungen aufstellt, die falsch sind und, wie man sagt, den Himmel auf den Kopf stellen, so dass der andre kaum sein Lachen zurückhalten kann« (Buch I, 19,39). Kreationismus ist peinlich – deutlicher kann man es nicht sagen. Die Christen müssen die sicheren wissenschaftlichen Erkenntnisse akzeptieren.

Das hermeneutische Problem hat sich seit der Antike weiterentwickelt. Heute liegen ausgearbeitete philosophische Hermeneutiken und Interpretationstheorien vor. Sie ermöglichen eine sorgfältige und methodisch kontrollierte Analyse, Einordnung und Interpretation biblischer Texte. So lässt sich beispielsweise die erste Schöpfungserzählung (Genesis 1,1–2,4a) einer ganzen Gattung ähnlicher Texte des alten Orients zuordnen, die eine geistliche Botschaft anders überliefern, als dies lehrmäßige Aussagen tun.

Es gibt verschiedene Ansichten darüber, was nun die geistliche Botschaft der ersten Schöpfungserzählung ist: von der Vorstellung, dass die Welt als ganze auf einen Entschluss Gottes zurückgeführt wird, also eine vernünftige, ordnende Instanz hinter der Entstehung der Welt steht, bis dahin, dass hier bestimmte Lebensnormen gerechtfertigt werden, etwa das Sabbatgebot oder die Sonntagsruhe.

Exegeten müssen einen Text also dahingehend sortieren, was als direkter Aussageinhalt gelten kann (zum Beispiel die Schöpfung durch Gott) und was der bildhaften Ebene zuzurechnen ist, die nur bestimmte Inhalte verdeutlichen soll (der Schöpfungsablauf in sechs Tagen). Das gilt auch für Lehr-

texte, die stärker auf der begrifflichen Ebene operieren. Wenn, wie in der Geschichte oft geschehen, christliche Lehren mit philosophischen Begriffen zum Ausdruck gebracht wurden, so unterscheiden sich solche Begriffe von der eigentlichen religiösen Botschaft. Dazu sagte der derzeitige Papst, es sei ein hermeneutischer Fehlgriff, zu meinen, dass die Bibel nicht nur die religiöse Wirklichkeit darstelle, sondern auch die darin verwendeten Begriffe endgültig geklärt habe. »Dies bleibt vielmehr weit gehend eine Aufgabe des die Phänomene geistig durchdringenden theologischen Denkens.« So müssen also im Licht neuer Situationen oder neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse die Texte immer wieder neu gedeutet und auch Selbstverständlichkeiten der Bibelinterpretation grundsätzlich in Frage gestellt werden. Vielleicht ist es sogar nötig, mehrere Deutungen nebeneinander zu akzeptieren.

Die Hermeneutik religiöser Texte ist aber nur eine Weise, wie augenscheinliche Widersprüche beseitigt werden können. Die Theologie hat weitere Baustellen, auf denen sie mit echten Schwierigkeiten zu ringen hat. Ich will Pars pro Toto zwei davon nennen. Zuerst das wohl gewichtigste aller Probleme für den Theismus: die Bedeutung des Übels, im Deutschen nach Gottfried Wilhelm Leibniz oft auch Theodizee (griechisch für: Rechtfertigung Gottes) genannt. Wie verträgt sich die Existenz eines allmächtigen, allgütigen und allwissenden Gottes mit dem vielen Übel in der Welt? Sicher: An gewissen Übeln sind die Menschen selbst schuld. Für sie sollte man Gott nicht verantwortlich machen. Es bleiben aber die physischen Übel, die nicht auf menschliches Handeln zurückgehen.

Der amerikanische Religionsphilosoph Alvin Plantinga (* 1932) hat vorgeschlagen, die Existenz Gottes durch den Hinweis auf die menschliche Freiheit zu verteidigen. Die Existenz von Menschen, die frei und selbstverantwortlich handeln können, ist nach Plantingas Theorie der *free will defense* ein hohes Gut. Wer frei ist, kann sündigen, vielleicht muss er es sogar. Aber muss es in diesem Ausmaß geschehen? Wären wir nicht ebenso frei, wenn wir alles könnten, was wir können – außer andere zu töten? Und wäre die Welt dann nicht besser? Warum hat ein allgütiger Gott dann nicht diese bessere Welt erschaffen?

Ein Gott, der seine Allmacht selbst beschränkt

Was die physischen Übel angeht, wollten manche Autoren des Alten Testaments auch diese auf den Menschen zurückführen. Wer sich gegen Gott stellt, den bestraft Gott eben durch Dürren, Erdbeben, Sintflut oder einen frühen Tod. Dieser »Tun-Ergehen-Zusammenhang« wurde aber schon im Alten Testament theologisch überwunden. Spruchreif wurde das Thema im Neuen Testament: »Weder er noch seine Eltern haben gesündigt, sondern das Wirken Gottes soll an ihm offenbar werden« (Johannes 9,3), sagt Jesus über einen blind Geborenen. Demnach kann man das Übel als Gelegenheit oder Voraussetzung für das Gute ansehen beziehungsweise dafür, dass das Gute im »Wirken Gottes« sichtbar werden kann. Anders gesagt: Das Übel könnte von Gott um eines höheren Gutes willen in Kauf genommen worden sein. Solche Überlegungen finden sich beim britischen Religionsphilosophen Richard Swinburne (* 1934), aber ähnlich auch schon bei theologischen Klassikern wie Thomas von Aquin. Dann besteht zumindest für das harte, logische Problem des Übels *(logical problem of evil)* Aussicht auf Lösung: Dass der gute Gott um das bestehende Übel weiß, es ändern kann und will, erzeugt keinen harten Widerspruch mehr.

Das Problem des Übels lässt sich weiter abschwächen, wenn man die Allmachtsvorstellung modifiziert, etwa durch die Annahme, dass Gott im Entschluss zur Schöpfung seine Allmacht selbst begrenzt hat. Diese Variante wird sogar

AKG IMAGES (GEMÄLDE VON LUCAS CRANACH D.Ä. AUS DEM JAHR 1522)

PUBLIC DOMAIN

Martin Luther (Bild links) polemisierte gegen die Vernunft als »die höchste Hur, die der Teufel hat«. Für Anselm von Canterbury war Glaube nur mit Vernunft möglich.

Wie beweisen, dass Gott existiert?

Gottesbeweise sind Argumente für die Behauptung, dass (ein) Gott existiert. Sie faszinieren die Denker schon seit Jahrtausenden – vom griechischen Philosophen Aristoteles in der Antike bis zum bedeutenden Logiker Kurt Gödel im 20. Jahrhundert.

Aristoteles argumentierte etwa so: Es gibt Veränderungen in der Welt, und jede hat eine Ursache. Eine Kette von Ursachen kann jedoch nicht ins Unendliche reichen, also hat sie ein erstes Element, den »unbewegten Beweger«.

Ein anderes Argument findet sich bei Thomas von Aquin: Vieles in der Welt ist so, wie es ist, könnte aber auch anders sein. Die Welt ist, fachlich gesprochen, kontingent. Wenn das aber so ist, dann muss die Welt durch etwas anderes bestimmt sein, bei dem man wieder fragen kann, ob es selbst kontingenter- oder notwendigerweise so ist, wie es ist. Und so weiter. Weil aber auch diese Kette nicht unendlich so weitergehen kann, muss man zu etwas Erstem, Notwendigen kommen – und das nennt Thomas von Aquin Gott.

Ganz anders Descartes' ontologisches Argument: Gott ist das vollkommenste Wesen. Zu existieren ist eine Vollkommenheit. Also muss Gott existieren.

Ein heute im Zusammenhang mit »Intelligent Design« häufig diskutiertes Argument hat folgende Form: Es gibt in der Welt geplant aussehende Strukturen, also muss die Welt auf eine planende Intelligenz zurückzuführen sein.

Gottesbeweise sind schon immer Gegenstand der Kritik gewesen. Immanuel Kant hat die Erfolgsaussichten von Gottesbeweisen mit zwei Thesen grundsätzlich in Frage gestellt: Erstens setzten sie alle letztlich den ontologischen Beweis voraus (reduktionistische These). Zweitens scheitere dieser daran, dass »Sein« zwar ein logisches, aber kein sachbestimmendes Prädikat ist. Zur Vollkommenheit eines Wesens trage es daher nichts bei, ob das Wesen tatsächlich existiert oder nicht (ontologische These).

Die Mehrheit der Philosophen stimmt Kant zu. Eine Minderheit überprüft kritisch die Voraussetzungen seiner Argumentation und mögliche Einwände dagegen. Wieder andere verstehen Gottesbeweise lediglich als Selbstvergewisserung einer längst gläubigen Vernunft.

Um einen bestimmten Gottesbeweis(versuch) zu beurteilen, lohnt es sich, genau hinzusehen. Dabei sollte man vermeiden, ein bestimmtes Argument in Bausch und Bogen zu verwerfen, nur weil vielleicht überzogene Versionen davon existieren. Intelligent-Design-Vertreter zum Beispiel behaupten zu viel, wenn sie von den planvoll scheinenden Strukturen der Welt auf eine außerweltliche Ursache schließen. Denn Kosmologie und Evolutionstheorie liefern anders lautende wissenschaftliche Erklärungen. Dennoch könnte es sinnvolle Teilstrukturen solcher Argumente geben – Kinder, die man nicht mit dem Bade ausschütten sollte.

christlich-theologisch nahegelegt. Denn wenn ein wirklich guter »Vater« seinen eigenen »Sohn« in das schlimmste Verderben am Kreuz gehen lassen muss, so steht das schon in einer gewissen Spannung zu einem (vielleicht naiven) Allmachtsbegriff. Trotzdem bleibt das Übel ein gewichtiges Argument gegen den Theismus *(evidential problem of evil)*.

Will man die Glaubwürdigkeit des Theismus neutral von außen beurteilen, sind positive und negative Belege gegeneinander abzuwägen. Das Problem des Übels belastet zweifellos die Waagschale, auch wenn man es, wie gezeigt, etwas abschwächen kann. In der Innenperspektive des Gläubigen jedoch bleibt das Problem aus zwei besonderen Gründen drängend: Für Christen handelt es sich nicht nur um eine Infragestellung Gottes, sondern auch um eine Frage *an* Gott, wie er das Übel zulassen kann. Und es ist eine Frage an das eigene Gewissen, was man selbst angesichts des Leids eigentlich tun soll.

Einen anderen Weg, mit Widersprüchen umzugehen, beschreiten Philosophen wie der Brite Peter Geach (* 1916) oder der Amerikaner Peter van Inwagen (* 1942). Bezüglich der Trinitätslehre mit ihrer Wesenseinheit von Vater, Sohn und Heiligem Geist bedienen sich die beiden Denker logischer Mittel und Methoden. Ihr Ansatz funktioniert ungefähr so: Bestimmte Kernaussagen werden in Formeln übersetzt und bilden gemeinsam mit geeigneten Hintergrundannahmen und entsprechender Logik eine formale Theorie. Von dieser lässt sich durch Angabe eines Modells zeigen, dass sie widerspruchsfrei ist. Damit haben die Forscher zumindest gezeigt, dass die Trinitätslehre nicht in sich widersprüchlich ist, sondern immerhin etwas Denkmögliches zum Ausdruck bringt.

Umstrittene Wissenschaftlichkeit

Religionsphilosophen können damit weitere Theorien über religiöse Überzeugungen aufstellen und auf ihre Vereinbarkeit untersuchen. Theologen dagegen müssen beurteilen, ob die Kernaussagen selbst angemessen und die Theorien theologisch adäquat sind. Auch bei dieser Strategie zur Widerspruchsbeseitigung spielt Theologie also eine wichtige Rolle – und zwar als ein wissenschaftliches Unterfangen. Wie steht es aber um ihre Wissenschaftlichkeit?

Kurz gesagt, sie ist umstritten. Theologen, Theologiekritiker und Wissenschaftsphilosophen haben darüber bereits zahllose Argumente ausgetauscht (siehe auch das Streitgespräch ab S. 64). Ein Problem dahinter: Es gibt keine allgemein akzeptierte Definition von Wissenschaft. Auf manche Kriterien können sich die Forscher schneller einigen als auf andere. Der Kern des Streits liegt in der so genannten Glaubensbindung. Bei allen anderen Kriterien schneidet die Theologie ebenso gut ab wie andere Geisteswissenschaften. Die Bindung an den Glauben ist jedoch offenbar ein Spezifikum,

Denken nicht viele Menschen angesichts großartiger Naturphänomene automatisch an einen Schöpfer? Sind Struktur, Design, Schönheit, Sinn, die wir in der Natur vorfinden, nicht wenigstens Indizien für eine planende Intelligenz – wenn auch keine Beweise? Solche Fragen sind durch Kreationismus und Intelligent Design kontaminiert. Aber es ist eine Herausforderung, hier genauer zu analysieren und zu trennen zwischen dem, was man tatsächlich verwerfen kann, und dem, was sich in Grenzen akzeptieren lässt.

Gottesbeweise bleiben spannend, und zwar aus verschiedenen Gründen:

- als Versuche, die Reichweite der menschlichen Vernunft an den absoluten »Außengrenzen« zu testen,
- als hermeneutische Prüfsteine, denn die Identifikation von Fehlern in einem untersuchten Argument hängt von Vorentscheidungen des Interpreten ab,
- als hypothetische Argumente, die bestimmte Gottesbegriffe voraussetzen und gewissermaßen deren argumentative Leistungsfähigkeit testen,

GEMÄLDE, SANDRO BOTTICELLI ZUGESCHRIEBEN, 1481 / PUBLIC DOMAIN

Thomas von Aquin nannte fünf Gründe für die Existenz Gottes – etwa den Kontigenzbeweis.

- als relative Beweise aus einer bestimmten Axiomen-/Prämissenmenge. Denn die eigentliche Frage ist nicht, ob man die Existenz Gottes beweisen kann, sondern, welche logischen Prinzipien und welche inhaltlichen Annahmen man dafür braucht,
- als Wahrscheinlichkeitsakkumulatoren, indem sich die Plausibilität der Prämissen auf die Konklusion eines gültigen Arguments überträgt,
- als Kohärenzbrücken, denn sie stellen Zusammenhänge zwischen verschiedenen Teilen eines Weltbilds her, zum Beispiel zwischen religiösen und nichtreligiösen Überzeugungen wie der Existenz Gottes und der Kontingenz der Welt,
- als Bestandteile kumulativer Argumente für die Vernünftigkeit religiöser Überzeugungen, in die auch religiöse Erfahrungen oder die Orientierungsleistung eines Weltbilds eingehen.

Offenbar ist die Zeit naiver Sicherheit (»Wir haben unseren Gott bewiesen!«) genauso vorbei wie die Zeit naiver Kritik (»Das funktioniert doch eh nicht!«). Heute machen einige Philosophen die Gottesbeweise zum Gegenstand anspruchsvoller begriffsanalytischer und logischer Untersuchungen. *C. T.*

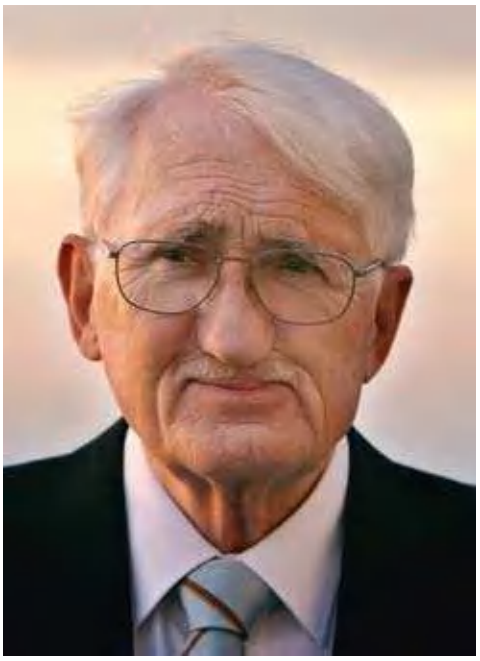
das Theologie von anderen akademischen Fächern unterscheidet. Dabei lassen sich zwei Aspekte unterscheiden: die inhaltliche Bindung an den Glauben als Menge bestimmter Überzeugungen und die formale Bindung an die Glaubensinstitution der Kirche.

Wissenschaftspragmatisch scheint die Bindung an die Institution Kirche die größeren Irritationen hervorzurufen. Forscher empfinden schließlich schon die Wissenschaftspolitik als Einmischung – umso mehr dann die einer Institution wie der Kirche. Wissenschaftstheoretisch halte ich aber die inhaltliche Bindung der Theologie an den Glauben für das interessantere Problem, weil dies ja die zentrale Frage nach dem Verhältnis von Vernunft und Glaube berührt.

Einige Experten argumentieren, dass die Bindung an einen Glauben eine weniger starke Einschränkung darstellt, als es auf den ersten Blick scheint. Es gibt viele theologische Teildisziplinen, die sich der Methoden anderer Wissenschaften bedienen und zumindest über weite Strecken ihrer Tätigkeit ergebnisoffen vorgehen. Ein Kirchenhistoriker etwa ist zweifellos auf einen bestimmten historischen Untersuchungsgegenstand festgelegt, forscht aber, ohne dass seine Resultate schon vorher irgendwie feststünden.

Eine Abschwächung des Problems bedeutet natürlich noch nicht seine Lösung. Um weiterzukommen, bieten Philosophen wie Thomas S. Kuhn (1922–1996) oder Jürgen Habermas (* 1929) hilfreiche Ansätze. Ihnen zufolge hängt jedes wissenschaftliche Forschen von verschiedensten Vorannahmen ab, wozu neben ontologischen und methodologischen Voraussetzungen durchaus auch außerwissenschaftliche Interessen des Forschers gehören. Die vermeintliche Lösung eines Problems durch Hinweis darauf, dass andere es auch haben, ist jedoch nicht wirklich zufrieden stellend. Etwas weiter kommt man mit Habermas' These, dass Wissenschaftler für ihre Prämissen Gewissheit beanspruchen müssen und damit auf einen Akt der Anerkennung oder des Glaubens angewiesen sind. Die Frage ist dann, ob es sich bei dieser Anerkennung wirklich strukturell um etwas Ähnliches handelt wie bei der Glaubensvoraussetzung der Theologie.

Man könnte aber auch direkt für einen Vernunftoptimismus des Glaubens argumentieren. Ein Grund dafür hat interessanterweise mit seinem oft geschmähten Wahrheitsanspruch zu tun: Gerade weil der christliche Glaube beansprucht, wahr zu sein, muss er davon ausgehen, dass er Ergebnissen der Naturwissenschaften nicht wirklich widersprechen kann. Denn wenn beides wahr wäre, Glaube und wissenschaftliche Erkenntnis, und beides sich widerspräche, müsste es zwei sich widersprechende Wahrheiten geben. Das aber ist offenkundig unmöglich. Die entscheidende Frage lautet hier, ob der Glaube seinen Wahrheitsanspruch auch berechtigterweise erheben kann.



DPA / OLIVER BERG

AGÊNCIA BRASIL / FÁBIO POZZEBOM / CC-BY-3.0

Der Philosoph Jürgen Habermas (links) wies darauf hin, dass auch Wissenschaftler über ihre Prämissen Gewissheit haben müssen und daher auf einen Akt des Glaubens angewiesen sind. Papst Benedikt XVI. sieht im christlichen Gott eine vernünftige, den Kosmos schaffende, ordnende und erhaltende Macht.

Religionskritiker würden genau das bestreiten. Es ist schwierig, die Frage nach der Wahrheit des Glaubens von außen zu beantworten. So lange sie aber offenbleibt, reduziert sich das Problem der Glaubensbindung darauf, dass es sich um die Bindung an etwas handelt, dessen Wahrheit sich erst noch herausstellen muss. Man könnte also wissenschaftliche Theologie für möglich halten unter der Bedingung, dass es sich erst noch erweisen muss, ob Theologie selbst eine Wissenschaft ist oder nicht. Solange das Gegenteil nicht bewiesen ist, sollte man wenigstens vorläufig an ihrem Wissenschaftsstatus festhalten – vor allem, weil Theologie schließlich viele der anderen Kriterien für Wissenschaftlichkeit erfüllt. Das wäre auch im Sinn eines gesunden Falisifikationismus. Und schließlich geht es um eine der Gründungsdisziplinen im abendländischen Universitätskanon. Letztlich bleibt es jedoch dabei, dass die Frage theoretisch nicht eindeutig entschieden zu sein scheint. Das bringt pragmatische Argumente ins Spiel.

Theologie in der Zwickmühle

Die Theologie als Wissenschaft hat es an den heutigen Universitäten nicht leicht. Sie steht von zwei Seiten unter Druck: Auf der einen wird sie von Religionsgegnern bedrängt sowie von Leuten, die überzeugt davon sind, dass Religion und Wissenschaft, Glaube und Vernunft einander grundsätzlich ausschließen. Auf der anderen Seite zerren traditionalistische kirchliche Kräfte an ihr, die vernünftige Dispute scheuen und darin eine Bedrohung des Glaubens sehen. Theologie muss beiden Kräften standhalten, wenn sie das bleiben will, was sie im Abendland geworden ist: eine einzigartige Synthese des christlichen Glaubens mit der Vernunft – mit dem Anspruch, im Chor der Wissenschaften eine eigene Stimme zu haben.

Eine Theologie, die sich tagtäglich der universitären Auseinandersetzung stellen muss, ist für unsere Gesellschaft allemal besser als eine Theologie in einer abgeschotteten Sonderwelt aus Fideismus, Biblizismus, Kreationismus, Traditionalismus oder gar Fundamentalismus. Wenn wir uns staatliche Theologen leisten, hat das Vorteile für unsere Gesellschaft: Wir bewahren uns einen integrativen Teil der abendländischen Kultur; Kleriker erhalten eine vernunftverpflichtete Ausbildung, was nicht nur zu besseren Predigten führt, sondern auch die gemäßigten Kräfte in den Kirchen stärkt; unsere Kinder erhalten einen besseren Religionsunterricht, der sie eher religionsmündig macht als schlechter Unterricht oder gar keiner; die Kirchen können ihr soziales Engagement besser organisieren und fokussieren; für unsere Fragen nach den letzten Zusammenhängen der Welt und dem Sinn unseres Lebens erhalten wir Antworten am Leben, die sich über Jahrhunderte für unzählige Menschen bewährt haben. Theologie vermag, sie für einen rational denkenden Menschen zu erschließen und an die großen Bemühungen der Menschheit um Wissen und Weisheit anzubinden.

Bei all den Problemen könnte man fragen: Warum überhaupt der ganze Aufwand? Warum denn muss der Glaube all seine Widersprüche auflösen? Warum muss Theologie unbedingt auch Wissenschaft sein wollen? Warum sich nicht einfach auf den Standpunkt privater Überzeugungen und weltanschaulicher Entschiedenheit zurückziehen?

Diese Fragen lassen sich nicht mehr von außen beantworten. Denn sie zielen auf das, was jemanden, vom Standpunkt des Glaubens selbst aus betrachtet, so eng an die Vernunft bindet – und die Theologie so eng an die vernunftgebundene Wissenschaftlichkeit. Deshalb muss im Folgenden von innen her argumentiert werden.

Der christliche Glaube verstand sich immer als ein Glaube für den ganzen Menschen. Er ist, in den Worten von Anselm von Canterbury (1033–1109), *fides quaerens intellectum* –

Glaube, der nach Einsicht verlangt. Zentraler Inhalt der christlichen Verkündigung ist ein Heilsangebot Gottes, das nicht nur die emotionale Seite des Menschen betrifft oder nur sein Privatleben oder seine moralische Orientierung. Es geht um den ganzen Menschen. Wo Zustimmung »von ganzem Herzen« verlangt ist, lässt sich die Vernunft nicht am Eingang abgeben.

Dabei geht es letztlich um das Suchen und Fragen des Menschen selbst. Wenn wir in unserem Leben einen Sinn suchen, einen letzten Grund, auf den wir bauen können, einen Halt, ein Fundament, etwas oder jemanden, das/der unsere Welt im Innersten zusammenhält (womit hier einmal nicht die starke Kernkraft gemeint ist), dann suchen und fragen wir ja auch als ganze Menschen. Antworten, die nur einen Teil unseres Menschseins ansprechen, werden über kurz oder lang unbefriedigend bleiben.

Papst Benedikt XVI.: Gott ist »höchst-vernünftig«

Vom christlichen Standpunkt aus liegt der Grund für die Vernunftbindung des Glaubens in Gott selbst. »Im Anfang war das Wort, und das Wort war bei Gott, und das Wort war Gott«, so beginnt das Johannesevangelium. Es schreibt der göttlichen Schöpfermacht zu, *logos* zu sein – was nicht nur Wort bedeutet, sondern auch Vernunft oder Sinn. Das nimmt die Aussage von der alles zusammenfügenden, einrichtenden und ordnenden Schöpfermacht Gottes aus der ersten Schöpfungserzählung auf. Der zufolge war die Erde erst »wüst und wirr«, dann ordnet Gott sie, schafft Gestirne, Pflanzen, Tiere und den Menschen, »und sah, dass es gut war«. Gott ist demnach der Grund für die Ordnungsstrukturen der Welt, sein *logos* der Grund dafür, dass die Welt für uns verstehbar ist.

In der Rede von Papst Benedikt XVI. an der Universität Regensburg im Jahr 2006 war das einer der theologischen Kerngedanken. Das Argument ist im Kritikhagel fast untergegangen: Das Gottesbild des Christentums, von dem der Christ glaubt, dass er es letztlich von Gott selbst via Offenbarung empfangen hat, ist das Bild einer vernünftigen, den ganzen Kosmos schaffenden, ordnenden und erhaltenden Macht. Für den Gott des Christentums ist die Vernunft nicht irgendeine Äußerlichkeit, er ist selbst »höchst-vernünftig«. Und der Mensch, der als sein Abbild geschaffen wurde, hat durch die Fähigkeit, zu erkennen und zu verstehen, Anteil am Göttlichen.

Daraus ergibt sich auch etwas für das Verhältnis von Theologie und Philosophie. Weder die große mittelalterliche Synthese aus beiden noch die extrem religionskritischen philosophischen Standpunkte scheinen unverändert Bestand zu haben. Das Verhältnis beider Lager muss stets aufs Neue ausgelotet oder erstritten werden. Dabei ist Theologie aus verschiedenen Gründen auf Philosophie angewiesen. Philosophie hilft, Begriffe zu klären, Argumente zu überprüfen und weiterzuentwickeln. Sie reflektiert moralisch bedeutsame Begriffe und Begründungsstrategien. Philosophie lehrt die Theologen, Selbstverständlichkeiten und systematische Zusammenhänge zu hinterfragen, erarbeitet Theorien über Sprache, Denken, Verstehen, Erkenntnis, Wahrheit, Handeln sowie die Grundstrukturen der Wirklichkeit. All dies ist unverzichtbar für eine Theologie, die einen alten Glauben in heutiger Zeit verstehbar machen und begründet vertreten will.

Dabei scheinen zwar sehr viele Arten von Philosophie mit dem christlichen Glauben kompatibel zu sein, aber eben nicht alle. Wie lassen sich also für den Glauben weniger oder eher geeignete Philosophien unterscheiden? Hier spielen Kriterien wie das so genannte Explikationspotenzial eine Rolle: Welche Philosophie kann die Glaubenslehren am treffendsten ausdrücken oder erklären? Oder die Offenheit von philosophischen Standpunkten: Sind an einen bestimmten philosophischen Standpunkt auch Handlungsnormen, Werte oder Annahmen darüber gebunden, was es gibt oder nicht gibt?

Inkompatibilität zwischen dem Glauben und einer bestimmten Art von Philosophie liegt meist weniger an der philosophischen Methodik oder dem Arbeitsstil als vielmehr an Inhalten. So ist der *ontologische* Naturalismus, der behauptet, dass es nur dasjenige gibt, was naturwissenschaftlich fassbar ist, wohl unvereinbar mit dem Glauben. Anders der *methodische* Naturalismus, der nur fordert, sich in der Naturwissenschaft auf das empirisch Fassbare zu beschränken: Damit sollte eigentlich kein Gläubiger ein Problem haben.

Auf den Punkt gebracht: Eine Religion, deren Gott vom Wesen her vernünftig ist, wird sozusagen von ihrer höchsten Instanz her auf ein positives Verhältnis zur Vernunft festgelegt. Dieses ist freilich kein gemütliches Ruhekissen, sondern dauernder Anspruch, Widersprüche zu beseitigen und Verstehen zu ermöglichen. Der Gläubige muss stets aufs Neue die Spannung aushalten zwischen der Treue zu den Wurzeln und dem Anspruch auf Vernunftmäßigkeit, der zum Kern des christlichen Gottesbilds gehört.

DER AUTOR

DAMIAN GORCZANY

Christian Tapp studierte Philosophie, Mathematik und Katholische Theologie, promovierte 2004 zum Dr. rer. nat. sowie 2007 zum Dr. phil. Er wurde 2008 als Professor an die Ruhr-Universität Bochum berufen. Dort leitet er den Lehrstuhl für Philosophisch-Theologische Grenzfragen und eine Emmy-Noether-Nachwuchsgruppe.

QUELLEN

Knapp, M.: Die Vernunft des Glaubens. Einführung in die Fundamentaltheologie. Herder, Freiburg 2009

von Kutschera, F.: Vernunft und Glaube. de Gruyter, Berlin 1991

Löffler, W.: Einführung in die Religionsphilosophie. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 2006

Tapp, C.: Kardinalität und Kardinäle. Wissenschaftshistorische Aufarbeitung der Korrespondenz zwischen Georg Cantor und katholischen Theologen seiner Zeit. Steiner, Stuttgart 2005

IHRE MEINUNG

Diskutieren Sie mit und kommentieren Sie diesen Artikel bei spektrum.de! **www.spektrum.de/vernunft**

TITELTHEMA: STREITGESPRÄCH

Was können **Wissenschaft** und **Religion** voneinander lernen?

Der Soziobiologe **Eckart Voland** und der Religionsphilosoph **Winfried Löffler** loten die Beziehungen und Grenzen zwischen Vernunft und Glaube aus.

Spektrum: Wissenschaft basiert auf Zweifeln und Hinterfragen, Religion baut auf Glaube und Dogma. In der Religion ist Glaube eine Stärke, in der Wissenschaft eine Schwäche. Warum also sprechen wir überhaupt über die Beziehung zwischen diesen Welten?

Professor Dr. Eckart Voland: Weil sich Religionen mit dieser Trennung nicht zufriedengeben. Sie erheben den Anspruch, Aussagen über das Sein, also ontologische Aussagen, zu treffen, ohne dabei die Überlegenheit der Wissenschaft gegenüber dem Mythos anzuerkennen. Und da wissen es die Wissenschaften dank ihrer kontrollierten Methoden zwar nicht immer, aber gelegentlich eben doch besser als die Dogmen der Religion. Dadurch entstehen fundamentale Konflikte.

Professor Dr. Dr. Winfried Löffler: Ich stelle die Entgegensetzung – hier Wissenschaft, da alle außerwissenschaftlichen Diskurse – in Frage. Unsere kognitive Verfassung hat drei Schichten. Innen gibt es den Bereich der Wissenschaften, wo wir es mit überprüfbaren Behauptungen zu tun haben. Darum herum liegen sonstiges Orientierungswissen und Grundannahmen. In der dritten Schicht schließlich gibt es weltanschauliche Ausdeutungen, die mehr oder minder rational sein können.

Welche Grundannahmen zählen für Sie zu der mittleren Schicht?

Löffler: Zum Beispiel jene, dass gleiche Einflüsse gleiche Wirkungen nach sich ziehen oder dass Gegenstände nicht plötzlich ihre Eigenschaften verändern. Das sind durchaus rationale Annahmen, obgleich sie nicht empirisch überprüfbar sind.

Haben Sie auch Beispiele für die dritte Schicht, die Weltanschauungen?

Löffler: Wenn etwa jemand die gesamte Wirklichkeit als Produkt eines Schöpfers sieht. Auch das Kausalprinzip gehört hierher. Die Konflikte zwischen Religion und Wissenschaft rühren oft daher, dass es zwischen den drei Bereichen nicht immer scharfe Grenzen gibt.

Herr Voland, worin besteht das Konfliktpotenzial zwischen Religion und Wissenschaft?

Voland: Herr Löffler hat es genannt – es ist die Ontologie. Was ist und was nicht? Diesbezüglich wissen Forscher längst nicht alles. Sie haben aber um Verlässlichkeit bemühte Methoden, um ihre Erkenntnisse zu mehren. Freilich müssen auch sie metaphysische Grundannahmen machen, die sie nicht weiter hinterfragen können. Anders geht es gar nicht. Aber sie sind offen für Revision.

Sehr viele suchen genau nach solchen Widersprüchen zum bisherigen Wissen. Weil man mit Widersprüchen den Nobelpreis gewinnt und nicht mit konformen Aussagen. Das ist in einem dogmatisch geschlossenen Universum nicht

ALLE BILDER DIESS ARTIKELS: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / PHILIPP ROTHE

möglich. Da wird derjenige anerkannt, der seine Dogmen nicht streng überprüft, sondern sie bestenfalls hermeneutisch interessant auslegt.

Herr Löffler, können Religionen in irgendeiner Weise wissenschaftlich sein? Oder anders gefragt: Was hat die Theologie an den Universitäten zu suchen?

Löffler: Zunächst einmal ist nicht Gott der Gegenstand der Theologie, sondern die menschliche Rede über Gott.

Voland: Aber ist es denn nicht so, dass die menschliche Rede über Gott von Gott diktiert ist durch die Offenbarung?

Löffler: Das wäre ein drastisch vereinfachtes Verständnis von Bibeltexten, das kein Theologe heute mehr so akzeptiert. Die Wissenschaftlichkeit der Theologie ist für ihre unterschiedlichen Disziplinen verschieden zu beurteilen – da gibt es ja einen ganzen Blumenstrauß: von Kirchengeschichte und Kirchenrecht über die Bibelwissenschaften zur systematischen Theologie. Kirchenrecht geht ähnlich vor wie die profane Jurisprudenz, Kirchengeschichte wie die normale Geschichtswissenschaft.

Das Konfliktpotenzial entsteht eher in der systematischen Theologie, vor allem in der Dogmatik und Moraltheologie; dort, wo es etwa um die Auslegung verbindlicher Texte geht. Bibel- und Lehramtstexte haben Bedarf an Hermeneutik (siehe Kasten S. 68), weil sie weit aus der Vergangenheit zu uns sprechen. Was uns beispielsweise das Konzil von Trient 1545 bis 1563 hier und heute zu sagen hat, liegt ja nicht einfach so auf der Hand.

Voland: Welchen Wissenschaftsbegriff verwenden wir hier denn? Benutzen wir den leibnizschen Begriff, nach dem Wissenschaft ein Korpus von anzuerkennenden Theorien und Meinungen produziert? Dann wäre Theologie in der Nähe der hermeneutischen Wissenschaften anzusiedeln. Oder aber wir folgen Galilei – dann wäre nur *Science* Wissenschaft. In diesem Fall gehört Theologie nicht dazu. Ob nun Theologie an die Universität gehört, kann man zunächst sehen als die Frage, welchen wissenschaftlichen Status Hermeneutik

Eckart Voland (links) ist Professor für Philosophie der Biowissenschaften an der Universität Gießen. Er studierte in Göttingen Biologie und Sozialwissenschaften. Er ist Autor eines Lehrbuchs zur Soziobiologie und edierte 2009 zusammen mit Wulf Schiefenhövel das Buch »The Biological Evolution of Religious Mind and Behaviour«.

Winfried Löffler ist Professor am Institut für Christliche Philosophie der Universität Innsbruck, wo er zuvor Rechtswissenschaften, katholische Theologie und Philosophie studierte. Zuletzt publizierte er die »Einführung in die Religionsphilosophie« sowie »Einführung in die Logik«.

hat – diesbezüglich gibt es wohl nur wenig Dissenz – und dann natürlich als Frage, wie Wissenschaft mit Dogmen umgehen soll.

Herr Voland, ärgert es Sie, dass es an Ihrer Universität eine theologische Fakultät gibt?

Voland: Mich ärgert es immer dann, wenn ich ausgerechnet in der Philosophie – aber auch in der Biologie – wieder anlehren muss gegen festgezurrte Grundüberzeugungen. Das ergibt kognitive Dissonanz, die von den Studierenden nicht immer konstruktiv aufgelöst werden kann, sondern dazu beiträgt, Philosophie und Wissenschaft abzublocken – und dies ausgerechnet an einer Universität.

Löffler: Die Universität ist eindeutig der richtige Platz für die Theologie. Sie braucht das akademische Umfeld. Es ist wichtig, dass die Funktionäre der Religionsgemeinschaften hochklassig ausgebildet werden, weil sie massiv in die Gesellschaft hineinwirken. Gute Ausbildung auch für Religionsvertreter im Licht der akademischen Öffentlichkeit ist gut im Sinn der Aufklärung.

Kann denn Religion vernünftig sein? Jede Offenbarungslehre ist doch konstruktiv irrational.

Löffler: Natürlich kann sie das. Ich will auf meine dritte Schicht der menschlichen Kognition zurückkommen, die weltanschauliche Einbettung. Es kann vernünftig sein, mir mit dem Glauben an einen theistisch verstandenen Schöpfergott einen Reim auf die Gesamtwirklichkeit mit allen Fassetten und Widersprüchen zu machen. Religionen können gute integrative Erklärungen für die Welt liefern. Das betrifft Fragen wie die nach der Herkunft des Kosmos, dem Sinn des Leidens, bestimmten Moralvorstellungen und Lebensstilen oder der Zukunft des Menschen. Jeder trägt so ein – mehr oder minder vernünftiges – Konzept mit sich herum, und da können Religionen schon zu den vernünftigeren gehören. Der entscheidende Unterschied zu anderen Weltzugängen ist doch: Sie sind nicht unmittelbar empirisch überprüfbar. Das sind solche Gesamterklärungen nie, auch der Naturalismus ist das nicht.

Voland: Ich möchte den Spieß umdrehen. Das berühmte Wort des Philosophen Karl Jaspers »Wahrheit ist, was uns verbindet« lässt sich auch umdeuten in ein »Was uns verbindet, ist Wahrheit«. Also: Erst war der Mythos, der uns evolutionär zusammengebunden hat zu kleinen kooperativen Gruppen und historischen Verbänden. Aber dieses Bindungspotenzial war nur zu nutzen, wenn Menschen im Mythos Wahrheit sehen.

Die Wahrheit ist also die abhängige Variable und nicht konstituierend für das soziale System. Wenn das so ist, dann müssten Theologen, sofern sie sich der Rationalität verpflichtet sehen, sehr selbstkritisch sein und jede dogmatische Anbindung aufgeben können.

Das wird niemals geschehen.

Voland: Da mögen Sie Recht haben, aber in dieser Sicht komme ich mit einem Verständnis von Religionen und ihrem Wahrheitsanspruch weiter. Weshalb soll ich Wahrheit suchen in archaischen Schriften, die nach allem, was man weiß, so nicht stimmen können? Wenn andererseits Wahrheit eine konstruktive Leistung einer interessierten menschlichen Psyche ist, die evolutionär entstanden ist, um Gruppen zusammenzubinden, nähere ich mich dem Problem aus einer funktionalen Perspektive mit hohem Erklärungspotenzial.

Löffler: Sie plädieren jetzt für einen Antirealismus in der Wahrheitstheorie und sagen: Wahr sind Konstrukte, die sich evolutionär behauptet haben.

»Auch Wissenschaftler machen unhinterfragbare **metaphysische Annahmen.** Aber sie sind offen für Revision«
(Eckart Voland)

»Religionen können gute integrative **Erklärungen für die Welt** liefern«
(Winfried Löffler)

Voland: Ich sage nicht, dass sie wahr sind, sondern sie werden für wahr gehalten. Die Grundaussagen der großen Religionen werden für wahr gehalten. Deshalb haben sie ihre motivierende Kraft, in ihrer sozialen Bindung nach innen, aber auch in ihren manchmal aggressiven Wirkungen nach außen. Da wird Wahrheit instrumentalisiert. Das heißt nicht, dass sie in irgendeinem wissenschaftlichen Sinn vorhanden wäre, sie wird vielmehr hineingedeutet. Aus der Perspektive der Wissenschaft schwächt das alle Wahrheitsaussagen von Religionen.

Löffler: Natürlich können auch religiöse Aussagen falsch sein und müssen sich kritischer Überprüfung aussetzen. Bei scheinbaren Widersprüchen ist einer der beiden Schuster nicht bei seinem Leisten geblieben: Weder sollte der Naturwissenschaftler versuchen, über Ziele und Wert des Ganzen Aussagen zu treffen, noch sollte der Theologe versuchen, zum Beispiel der bessere Evolutionsbiologe zu sein.

Es gibt viele Religionen mit ganz verschiedenen Vorstellungen – die können ja nicht alle zugleich wahr sein. Ist denn ein Ranking unter den Religionen denkbar: Wer hat die beste?

Voland: (*lacht*) Natürlich, die, die am meisten Nachkommen hervorbringt. Das ist dann zwar nicht die beste, aber immerhin die effektivste.

Löffler: Das ist ein großes religionsphilosophisches Problem. Der beste Zugang zu ihm scheint mir der so genannte inklusivistische Weg zu sein. Christen zum Beispiel würden sagen, auch andere Religionen haben tiefe Wahrheiten, selbst wenn ihnen die eigene Religion in der Regel als die zutreffendste erscheinen wird.

Voland: Das ist aber keineswegs so harmlos, wie Sie es formulieren. Man ist nicht immer der Meinung, dass andere Religionen auch ein bisschen plausibel sein können. Solange etwa Christen, und die gehören doch zusammen, nicht einmal in der Lage sind, ein gemeinsames Abendmahl zu feiern, ist Religion ein Spaltpilz. Glaube hat – zumindest nach außen in Auseinandersetzung mit anderen Religionen – eben nichts Versöhnliches und Harmonisierendes. Deswegen ist die Idee einer letztlich gemeinsamen Wahrheit in der pragmatischen Lebenswelt nicht einzulösen.

Löffler: Religiöse Konflikte bauen zumeist auf anderen kulturellen, ökonomischen oder sonstigen Konflikten auf, wo historische Rechnungen offen sind. Es ist da nicht die Religion an sich, die spaltet und zu Gewalt führt. Schließlich gab und gibt es viele Gesellschaften, wo verschiedene Religionen gut miteinander auskommen!

Voland: Das ist unbestritten. Aber wenn Konflikte existieren, tragen Religionen eher zur Eskalation als zur Friedensstiftung bei.

Wenn es in der Naturwissenschaft zu einem Gebiet verschiedene Theorien gibt, dann können nicht alle richtig sein, vielleicht sind sie sogar alle falsch.

Löffler: Ich hielte das auch in der Theologie für zulässig. Ein Text, der irgendwann als Dogma festgelegt wurde, spricht heute nicht aus sich heraus, er bedarf der Deutung. Die alten Texte kann man nicht einfach zur Hand nehmen, naiv lesen und die Botschaft verstehen.

Herr Löffler, Sie sagten, auch der Naturalismus sei nicht überprüfbar – wie meinen Sie das?

Löffler: Zunächst: »Naturalismus« hat viele Lesarten. Etwa als negativ-ontologische These – alles, was geschieht, geht, wie Gerhard Vollmer gesagt hat, mit rechten Dingen zu, also eine Art Verbot von Göttern, Seelen oder Wundern. Positiv ontologisch gesprochen gibt es die Fassung: Alles, was existiert, sind Felder, Teilchen oder andere materielle Phänomene. Das

ist aber keine wissenschaftliche Aussage mehr, das gehört zu dem zweiten Ring der metaphysischen Einbettung und ist nicht mit den Methoden der Naturwissenschaft prüfbar.

Voland: O doch! Nehmen wir einmal an, es würde ein Wunder geschehen. Dann wären Naturwissenschaftler durchaus in der Lage, zu erkennen, ob es sich tatsächlich um ein Wunder handelt oder nicht. Das Kriterium wäre, ob Naturgesetze verletzt werden oder nicht. Aber ich gebe zu, dass auch Naturwissenschaftler nicht voraussetzungslos arbeiten. Sie müssen beispielsweise davon ausgehen, dass es eine Welt außerhalb ihres Bewusstseins gibt und diese zumindest teilweise zu erkennen ist und sie nicht in einer Simulation leben. Das ist aber alles empirisch nicht zu überprüfen.

Was sind denn die Grenzen der naturwissenschaftlichen Methode?

Löffler: Ob dieses oder jenes Problem naturwissenschaftlich behandelbar ist, ist selbst keine naturwissenschaftliche Frage. Und Fragen wie »Woher oder wozu das Ganze?«, »Was ist wichtig im Leben?«, »Wo soll man sich engagieren?« sind auch keine naturwissenschaftlichen Fragen – dennoch aber kann man sie rational diskutieren.

Reduziert das den Zuständigkeitsbereich der Religionen nicht auf Orientierungsfragen?

Voland: Das sind doch die klassischen Fragen der Philosophie! Wenn die Naturwissenschaften sich entwickeln, wird sich so auch die Philosophie weiterentwickeln. Das ist gleichsam ein »koevolutionärer« Prozess. Und die Philosophie hat gegenüber der Theologie den Vorzug, dass sie sich bereitwillig von den modernen Wissenschaften informieren lässt.

Löffler: Wenn nach dem letzten Sinn der Gesamtwirklichkeit oder nach einer letztgültigen Aussicht des Menschen gefragt wird, dann sagen Philosophen dazu eher wenig und delegieren die Frage. Hier bieten aber Theologen Antworten an, etwa zum Sinn des Leidens.

Was ist denn der Sinn des Universums? Was ist der Sinn des Lebens?

Voland: Es gibt keinen Sinn des Universums. Es gibt keinen Sinn des Lebens und auch keinen Sinn des Leidens.

Kann man es hinnehmen, dass die Welt sinnlos ist?

Voland: Wir sollten zuvor klären, aus welcher Perspektive wir hier antworten – etwa aus derjenigen eines distanzierten, analytischen Wissenschaftlers, der nach einem objektivierbaren Sinn sucht. Oder jener meiner Introspektion und Kontemplation, die ich als Wissenschaftler auch betreibe, wo ich zu höchst subjektiven, womöglich wissenschaftsfernen Deutungen der Welt gelangen kann. Und wenn mich hier jemand fragt: Was ist denn dein Sinn des Lebens? Dann habe ich möglicherweise auch eine Sicht der Dinge.

Sagen nicht Evolutionsbiologen: Der Sinn des Lebens ist es, Nachkommen zu produzieren?

Voland: Nein, das ist nicht der Sinn, sondern der Zweck genetischer Programme.

Nochmals zu den Grenzen: Sinnfragen sind nicht naturwissenschaftliche, sondern religiöse Fragen, richtig?

Grundbegriffe im philosophischen Diskurs

Hermeneutik: Kunst der Auslegung von Texten und Symbolen, beispielsweise religiöser Schriften. Hermeneutik versucht, hinter deren vordergründiger Erscheinung die Bedeutung eines Textes und seines Mediums für den Empfänger der Botschaft zu erkennen.

Ontologie: Disziplin, die sich mit der fundamentalen Struktur der Welt und den grundsätzlichen Fragen der Existenz beschäftigt: Was bedeutet »Sein«, wie lässt sich »Seiendes« unterscheiden, und in welchem Verhältnis stehen verschiedene Objekte, die »sind«?

Religion: Gesamtheit der übernatürlichen, Sinn stiftenden Vorstellungen einer Kultur. Religionen verbinden weltliche Verhaltensregeln mit dem Glauben an Kräfte, die jenseits des unmittelbaren Zugriffs durch den Menschen liegen, durch Rituale teilweise aber erfahrbar werden.

Theologie: Wissenschaftliche Analyse der Inhalte von Glaubensdokumenten, der praktischen Ausübung einer Religion und ihrer Unterschiede zu anderen Glaubensrichtungen.

Pascalsche Wette: Entscheidungstheoretisches Argument des französischen Gelehrten Blaise Pascal dafür, dass es sich lohnt, an Gott zu glauben – unabhängig von einem Gottesbeweis. Wer darauf setzt, dass ein Gott existiert, wird, sofern er diese Wette gewinnt, nach dem Tod unendlich reich entlohnt. Sollte der Gläubige seine Wette verlieren, verliert er nicht viel oder hat vielleicht sogar schon ein glücklicheres Leben geführt.

Theodizee: Rechtfertigung Gottes angesichts des Leidens in der Welt. Wenn Gott allmächtig und gut ist, warum lässt er dann Böses zu? Auf diese Frage nach dem Sinn des Leidens existiert trotz großer historischer Bemühungen keine befriedigende Antwort.

Theismus: Glaube an einen Gott, der erhaltend in die Welt eingreift.

Animismus: Glaube an Seelen, Geister und eine beseelte Natur, wie er in der frühen kulturellen Entwicklung religiöser Vorstellungen entstand. Der Mensch wendet sich nicht einem allmächtigen Schöpfer zu, das Göttliche wohnt stattdessen vielen Aspekten der umgebenden Natur inne.

Agnostizismus: Ansicht, dass sich die Existenz eines Gottes weder beweisen noch widerlegen lässt – entweder, weil es keine starken Argumente pro oder kontra gibt (schwacher A.) oder weil die Frage gar nicht rational diskutierbar ist (starker A.)

»Es gibt keinen Bedarf für Gottesbeweise, weil Naturwissenschaft die Welt **als kausal geschlossen beschreiben kann**«
(Eckart Voland)

Voland: Wie gesagt: Es ist eine Frage der Perspektive. Die Ich-Perspektive ist keine naturwissenschaftliche. Aber natürlich kann man sich auch wissenschaftlich dem nähern, was Menschen unter Sinn verstehen. Dazu müsste man die Natur und Genese mentaler Repräsentationen studieren.

Wenn die Trennung der Themen klar ist, warum mischt sich Theologie noch immer in naturwissenschaftliche Belange ein? Denken Sie etwa an die Debatte um Intelligent Design!

Löffler: Das sind Irrläufer einer amerikanischen Debatte, die zu uns herübergeschwappt ist. Viel mehr als das ärgert mich, dass Forscher wie der britische Biologe Richard Dawkins versuchen, solche Auswüchse als theologischen Mainstream darzustellen, um sie dann undifferenziert zu bekämpfen. Kein Theologe von Rang würde so etwas unterschreiben.

Voland: Johannes Paul II. hat geäußert, dass der Geist nicht aus der Evolution kommen, auch kein Epiphänomen der Materie sein kann. Mit solchen grundlegenden Aussagen stellt man sich außerhalb jeder Wissenschaft. Wir haben also diese Konflikte, und sie lassen sich auch nicht auflösen.

Herr Voland, wie sehen Sie als Naturwissenschaftler die Religionen?

Voland: Ich argumentiere hier ganz geradeheraus psychologisch. Dualismus und Finalismus, also Grundbestandteile religiösen Denkens, sind kognitive Strategien, mit denen wir geboren werden. Sozusagen die Default-Option, die Welt zu betrachten. Und die produzieren gleichsam ganz automatisch eine gewisse Gläubigkeit und das Denken in Intentionen. Wir sind letztlich alle geborene Animisten. Und das erklärt, warum gerade in Deutschland so viele Leute sich zwar von der Kirche abwenden und ihre Institutionen kritisieren, aber nach wie vor ihren Glauben nicht aufgeben können.

Woran liegt das Ihrer Ansicht nach?

Voland: Diese Leute müssten sonst gegen die innersten Strategien ihres Weltzugangs angehen. Das ist nicht einfach zu bewerkstelligen.

Wäre denn mit einer Emanzipation vom inneren Glauben etwas gewonnen? Sollte man darauf überhaupt hinwirken, etwa als Naturwissenschaftler?

Voland: Ich bin der Auffassung, dass Wissen grundsätzlich besser ist als Nichtwissen. Ob Wissen immer willkommen ist, bleibt eine andere Frage. Aber ich bin für unbedingte Aufklärung. Und wenn wir begreifen, wie wir denken und was da für Fallen eingebaut sind, dann kann das doch an sich nur förderlich sein. Religionen haben ihre evolutionäre und historische Rolle gespielt und zum *survival of the fittest* beigetragen. Aber eben zu einem Preis, den zu bezahlen wir in der modernen Welt nicht mehr unreflektiert bereit sein sollten. Wir wissen heutzutage mehr von dem, was die Welt zusammenhält, wie die Welt läuft und welches die Gesetze dahinter sind – auch im sozialen Bereich. Das müssen wir nutzbar machen, und dazu brauchen wir Aufklärung mehr als Religion.

Was sagen Sie beide denn zum radikalen Naturalismus eines Richard Dawkins?

Voland: Seine Stoßrichtung ist schon richtig, aber er schießt über das Ziel hinaus. Glauben in Richtung Wahn, also in Richtung eines pathologischen Prozesses, zu stellen, wird der Sache nicht gerecht. Damit ist niemandem geholfen. Man sollte den Menschen nicht ihren Glauben nehmen, das wäre geradezu inhuman, denn trotz allem: Glauben kann eben auch psychohygienisch nützlich sein, weil er stabilisiert, wie jede Lebenslüge.

Noch einmal: Sollten Naturwissenschaftler ernsthaft darauf hinarbeiten, den Glauben aus der Welt zu treiben?

Voland: Wissenschaft sollte aufklären, auch über Religion und ihre anthropologischen und evolutionären Hintergründe und damit der interessierten Öffentlichkeit ein Angebot zum Verständnis der Dinge unterbreiten.

Löffler: Fast alles, was Dawkins in Bezug auf die Religionen behauptet, ist einfach falsch – egal ob Gottesbeweise, die pascalsche Wette oder anderes. Er hätte einen exzellenten Kreuzzugsprediger abgegeben!

Religionen sind, das haben Sie, Herr Voland, gezeigt, offenbar besonders für die frühe Stammesentwicklung nützlich gewesen. Diese Phase ist aber lange vorbei. Was also könnte die Funktion von Religionen in einer zivilisatorisch entwickelten, säkularisierten Welt sein?

Voland: Ihre ursprünglichen Funktionen haben sich verflüchtigt, weil wir in der Moderne hier in Rechtsstaatlichkeit leben. Wir brauchen die alten Institutionen nicht mehr, die einst zur Gruppenbindung beitrugen. Damals waren diese Denkgebäude sicher sehr funktional, weil sie Kooperation erleichtert haben. Aber wir haben dafür heute andere Instrumentarien. Was früher die In-Group-Moralität ausmachte, kann in einer modernen Welt sogar ambivalent werden, etwa wenn solche Gruppen aggressiv nach außen auftreten.

Löffler: Ich bin mir nicht sicher, ob dieses In-Group-out-Group-Schema auf alle Religionen gleich zutrifft. Das Christentum will das Freund-Feind-Schema ja gerade unterlaufen. Ihre Befunde scheinen eher auf frühe Stammesreligionen zu passen, auf moderne Großkonfessionen dagegen nicht. Der moderne Rechtsstaat zum Beispiel ist ein Kind des Christentums, seine Wurzeln liegen unter anderem im Kirchenrecht. Ich halte es für sinnvoll, diese Pumpe für gemeinschafts- und solidaritätsstiftende Einstellungen vital und aktiv zu erhalten. Da genügt es nicht, diese im Museum der Geistesgeschichte wegzupacken. Es kann gesellschaftliche Umwälzungen geben, in denen sich sehr schnell andere Ideologien durchsetzen, die sich dieser Leerstelle bemächtigen. Da würden auch die Kritiker den Religionen vielleicht sehr schnell nachtrauern.

»Ob sich ein Problem naturwissenschaftlich behandeln lässt, ist selbst **keine naturwissenschaftliche Frage**« (Winfried Löffler)

Sind Religionen also auch Wohlfühlgruppen?

Löffler: Grundsätzlich sehe ich daran nichts Schlechtes. Aber ich wehre mich dagegen, aus Nützlichkeitsüberlegungen ein Argument für die Wahrheit aufzubauen. Aus Nützlichkeit folgt nichts für die Wahrheit, so wenig wie aus Schädlichkeit die Falschheit folgt.

Voland: Die Gruppenbindung ist ja nur ein Aspekt. Ein anderer betrifft die Bewältigung der Kontingenz, also der scheinbaren Zufälligkeit der Welt. Auch Menschen, die ein Leben fern von Religionen führen, greifen in Krisen doch sehr gerne wieder zurück auf vergessen geglaubtes Gedankengut. Bei großen Unglücken sind Pastoren mit die Ersten am Ort – und sie werden nachgefragt. Die Menschen brauchen Trost. Was früher die Seelsorge geleistet hat, erfüllen Psychiater und Psychologen noch längst nicht adäquat. Deswegen misstraue ich auch Umfragen, in denen auf sinkende Zahlen von Katholiken oder Protestanten hingewiesen wird. In sicheren Lebensverhältnissen ist es einfach, nicht mehr fromm zu sein. Aber was ist, wenn existenzielle Probleme auftauchen? Dann erfolgt nicht selten ein Regress auf diese archaischen Denkmuster.

Ist das etwas Gutes oder Schlechtes?

Voland: Es ist für jeden Betroffenen zunächst etwas Gutes. Trost ist etwas sehr Wertvolles. Ich bin dafür, dass Menschen in der Krise Strategien haben, um damit fertigzuwerden. Alles andere wäre inhuman. Aber nichts ist umsonst. Und deshalb sollte sich jeder persönlich und die Gesellschaft insgesamt darüber klar werden, was in dem Angebotspaket »Religion« noch so alles enthalten ist.

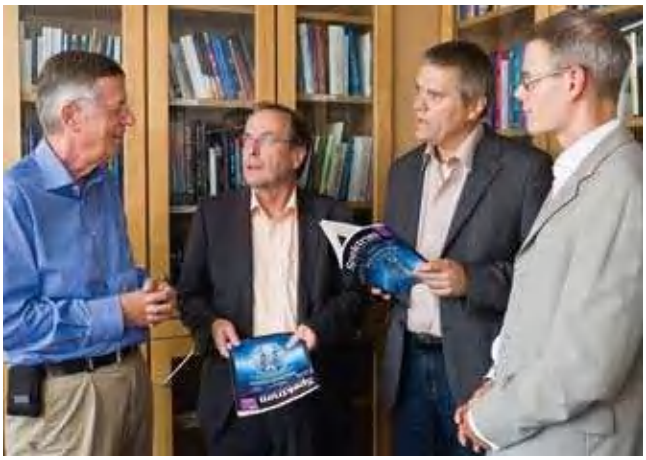
Wie steht es mit den Gottesbeweisen? Viele Naturwissenschaftler würden sagen, Immanuel Kant hat einst gezeigt, dass das ein absurdes Unterfangen ist.

Löffler: Diese Meinung lehne ich ab, da gibt es schon noch viel zu sagen, auch nach Kant und anderen. Ich würde aber nicht von Gottesbeweisen sprechen, das weckt nur falsche Erwartungen eines bestimmten Beweisbegriffes, die nicht erfüllbar sind. Ich spreche lieber von Argumenten zu Gunsten der Existenz Gottes. Da scheint mir, dass es einige gibt, die durchaus einen gewissen intellektuellen Charme haben.

Welche?

Löffler: Zum Beispiel das Argument aus dem kosmologischen Standardmodell. Man akzeptiere einmal das Prinzip: Alles, was irgendwann zeitlich beginnt, hat auch eine Ursache. Sofern man das auch auf das Universum insgesamt anwenden darf, dann ist es plausibel zu sagen, auch das Universum ist verursacht. Und das könnte eine gewisse Ähnlichkeit mit einem Gott im theistischen Sinn haben. Das Standardmodell mit seinem physikalischen Erklärungsabbruch in Gestalt der Anfangssingularität plus der Annahme eines theistischen Gottes dahinter – dies erscheint mir immer noch plausibler als extravagante Alternativkosmologien über parallele oder zyklische Universen. Das ist zwar kein Beweis, aber ein Argument, das mir nicht völlig irrational erscheint.

Voland: Die Frage ist doch: Von welchem Gott reden wir? Von einem, der möglicherweise hinter allem steht, jenseits der Grenzen unseres Wissens? Dann bin ich ganz demütig und sage: Niemand kann hinter diese Grenzen schauen, sonst wären es keine. Man mag darüber spekulieren und kontemplieren, aber es hilft wissenschaftlich nicht weiter. Oder sprechen wir über den personalen Gott des Christentums, der eingreift, der Interessen hat, straft, liebt, Wunder vollbringt, die Wahrheit schafft und dies und jenes kann? Da gibt es keine Notwendigkeit für einen Gottesbeweis, weil die Naturwissenschaft gezeigt hat, dass man die Welt mit guten Gründen als kausal geschlossen beschreiben kann. Es wird nicht eingegriffen in das Geschehen. Von daher gibt es keinen Bedarf, etwas zu beweisen, was ich nicht für meine Erklärungen benötige.



Eckart Voland (Zweiter von links) und Winfried Löffler (Zweiter von rechts) mit den Spektrum-Redakteuren Reinhard Breuer (links) und Carsten Könneker

Löffler: So einfach ist es mit der kausalen Geschlossenheit der Welt nicht, auch nicht in der modernen Physik.

Eine Besonderheit beim Gottesbegriff – allmächtig, allwissend, allgütig – ist die Frage, wie das Übel in die Welt kommt, das berühmte Theodizee-Problem, wie es Leibniz genannt hat. Das steht in offensichtlichem Widerspruch zum Gottesbegriff. Manche Religionsphilosophen sagen, daran scheitern alle Religionen.

Löffler Ich gebe zu, das Problem des Übels ist der massivste religionskritische Einwand. Ich glaube auch nicht, dass es dafür wirklich interessante philosophische Lösungen gibt.

Voland: Eine theologische Erblast, die in diesem Zusammenhang erfunden wurde, ist der freie Wille. Es gibt nur eine Erklärung für das Übel in der Welt: Der Mensch kann sich frei gegen Gott entscheiden.

Löffler: Was ist mit dem physischen Übel, Herr Voland? Den Tsunami von Fukushima hat niemand durch Missbrauch seines freien Willens ausgelöst.

Lebt der Gläubige einfach auch mit den Widersprüchen des Glaubens?

Löffler: Bei der Frage nach dem Sinn des Leidens gibt es vielleicht Antworten aus christlicher Sicht, aber nicht aus philosophischen Überlegungen.

Voland: In der Naturwissenschaft gibt es da gar kein Problem. Leben passiert, Evolution passiert, wir haben Geschichte, kosmische Ereignisse, die wirken – das ist einfach Kontingenz. Früher wurden solche Katastrophen im Rahmen von Sozialtheorien sogar als Strafe gedeutet, selbst das Erdbeben von Lissabon 1755 – ein Unding.

Atheisten sind, so sagen manche, auch nur gläubige Menschen. Sie glauben an die Nichtexistenz Gottes.

Voland: Wir sollten unterscheiden zwischen Religiosität, Frömmigkeit und Religion. Unter Religiosität versteht man die neuronalen Dispositionen dafür, gegebenenfalls fromm werden zu können, wenn die Umstände es begünstigen – vergleichbar der Sprach- oder Moralfähigkeit des Menschen. Religiosität halte ich für eine biologische Angepasstheit, und über die verfügt jeder *Homo sapiens sapiens*, auch der Atheist. Frömmigkeit ist die persönliche Manifestation dieser Veranlagung, und Religion schließlich ist die symbolisch-kulturelle Nische, in der fromme Menschen leben.

Müssten also eigentlich alle Menschen religiös sein?

Voland: Ja, in dem Sinn, dass sie ein Potenzial zur Frömmigkeit haben. Das heißt aber nicht, dass die Anlage zur Frömmigkeit immer manifest werden muss. Viele Entwicklungsschritte sind konditionale Prozesse. Nur unter bestimmten Bedingungen kann sich Religiosität in Frömmigkeit niederschlagen, die dann Gestalt annimmt in der Religion, in die man zufällig hineingeboren oder zu der man bekehrt wird. Im Übrigen halte ich es nicht für ausgeschlossen, dass Religiosität auch außerhalb von Religionen Gestalt annehmen kann. Man denke nur an bestimmte Formen des Sportfanatismus, der Popkultur, politischer Ideologien und vielleicht sogar auch an Aspekte des Wissenschaftsbetriebs.

Kann man sich zum Atheismus bekehren?

Voland: Natürlich. Ich kenne persönlich Menschen, die von Religion und Kirche enttäuscht wurden und heute mit derselben gläubigen Inbrunst das Gegenteil vertreten. Das ist aber nur eine Teilmenge unter den Atheisten. Ein weitaus größerer Teil kommt zum Atheismus durch rationale Überlegungen; das Theodizee-Problem spielt da eine gewisse Rolle. Der Widerspruch zwischen Güte und Allmacht Gottes geht nicht auf, was nachdenkliche Menschen aus rationalen Gründen dazu bringt, vom Glauben abzufallen.

Manche sagen, Agnostiker seien windelweiche Atheisten.

Löffler: Vielleicht sind Agnostiker nur erkenntnistheoretisch vorsichtiger, *never say never*. Nachdem Nichtexistenzthesen immer sehr schwer zu begründen sind, ist das wissenschaftstheoretisch gar keine so schlechte Einstellung.

Herr Voland: Was sollten Wissenschaftler in Bezug auf religiöse Menschen nicht tun?

Voland: Hochnäsig werden.

Herr Löffler: Was sollten religiöse Menschen in Bezug auf Naturwissenschaftler nicht tun?

Löffler: Sie sollten nicht alles glauben, sondern schauen, wo der wissenschaftliche Befund aufhört und das persönliche Bekenntnis anfängt. Die Debatte leidet zum Teil an diesen Vermengungen, dass Wissenschaftler, denen eine große Entdeckung gelang, dann am großen Prestige der Naturwissenschaften naschend zum Weltanschauungsprediger werden.

Herr Löffler, Herr Voland, wir danken Ihnen für das Gespräch. ~

Die Fragen stellten die Spektrum-Redakteure **Reinhard Breuer** und **Carsten Könneker**.

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1130112**

WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

David Hilbert

Vor 150 Jahren wurde ein Mann geboren, der die Mathematik des 20. Jahrhunderts geprägt hat wie kein anderer – und sich wenig um gesellschaftliche Konventionen scherte.

VON MARC DRESSLER

Dem kleinen David Hilbert war nicht anzusehen, dass er einmal zum größten Mathematiker seiner Zeit aufsteigen würde. Am 23. Januar 1862 in Königsberg als Sohn eines Amtsgerichtsrats geboren, tat er sich an der Schule noch nicht sonderlich hervor. Im Gegenteil: In dieser Zeit sei er »ein wenig dammelig« gewesen, sagte er später von sich selbst. Immerhin machte er ein ordentliches Abitur und begann in seiner Heimatstadt Mathematik zu studieren.

Da war sein zwei Jahre jüngerer Studienkollege Hermann Minkowski (1864–1909) schon ein ganz anderes Kaliber: Abitur mit 15, Promotion mit 21. Aber die beiden freundeten sich an und blieben einander verbunden, bis Minkowski mit nur 44 Jahren an einem Blinddarmdurchbruch starb. Jeden Nachmittag trafen sie sich zu einem Spaziergang durch Königsberg. Dabei sog Hilbert den mathematischen Geist ihrer Gespräche ein wie die frische Ostseeluft an der Pregelmündung. Diese Form des Lernens wurde Teil seiner selbst. Stets zog er den lebendigen Austausch unter freiem Himmel dem Studium angestaubter Folianten in einer Bibliothek vor.

Hilbert promovierte 1885, im gleichen Jahr wie Minkowski – im vergleichsweise fortgeschrittenen Alter von 23 Jahren. Aber damit hatte der Spätstarter gewissermaßen aufgeholt. 1888 machte er erstmals von sich reden, als er den Satz bewies, der heute als »Hilberts Endlichkeitssatz« bekannt ist.

Der Satz löst ein Problem, wie es die Mathematiker sich häufig selbst bereiten: Zunächst konstruieren sie Objekte, die aus irgendeinem Grund ihr Interesse erregen, in diesem Fall homogene Polynome in zwei Variablen. Das sind Funktionen der Form

$$f(x,y) = a_n x^n + n\, a_{n-1} x^{n-1} y + (n(n-1)/2)\, a_{n-2} x^{n-2} y^2 + \ldots + a_0 y^n.$$

Dann denken sie darüber nach, was mit den Koeffizienten $a_0, a_1, \ldots a_n$ geschieht, wenn sie für die (x, y)-Ebene, auf der die Funktion lebt, andere Koordinaten wählen als eben x und y. Im Allgemeinen hat die Funktion nach einer solchen Koordinatentransformation andere Koeffizienten; aber irgendwie sollte man doch erkennen können, dass es »eigentlich« immer noch dieselbe Funktion ist. Also sucht man nach Eigenschaften der Koeffizienten, denen eine Koordinatentransformation nichts ausmacht, so genannten »Invarianten«.

»Das ist nicht Mathematik, sondern Theologie.« »Aber auch die Theologie hat gewisse Verdienste«
Paul Gordan

Jetzt wollen die Mathematiker sich einen Überblick über das selbst eingebrockte Durcheinander verschaffen, in diesem Fall über alle möglichen Invarianten, die ihrerseits Polynome in den Koeffizienten $a_0, a_1, \ldots a_n$ sind. Das ist eine höchst unübersichtliche Menge; unendlich ist sie sowieso, und vor allem sind ihre Elemente nicht durch eine Konstruktionsvorschrift, sondern nur über eine Eigenschaft definiert, nämlich Invarianten zu sein. Da wäre man glücklich, wenn es einige wenige Bauklötze gäbe, aus denen sich alle Invarianten zusammensetzen ließen.

Hilberts Endlichkeitssatz sagt aus, dass auf jeden Fall ein endliches Sortiment an Bauklötzen genügt. Aber er gibt diese »Urbausteine« (der offizielle Ausdruck ist »Erzeugende«) nicht an; er liefert auch keine Konstruktionsvorschrift, mit der man sich ein solches Sortiment anfertigen könnte. Sein Beweis sagt nur: Nehmen wir an, das Sortiment wäre unendlich. Dann geht man dessen Urbausteine der Reihe nach durch und wählt aus der (unendlichen) Menge aller Invarianten, die man aus den ersten n Urbausteinen zusammensetzen kann, eine geeignete aus. Das tut man für alle n und erhält eine unendliche Folge von Invarianten mit gewissen Eigenschaften. Aus ihnen leitet man mit weiteren Beweisschritten einen Widerspruch her. Also hat es ein unendliches Sortiment von Anfang an nicht gegeben.

»Das ist nicht Mathematik, sondern Theologie«, lästerte Paul Gordan (1837–1912), der es eigentlich wissen musste, galt er doch als König der Invariantentheorie. Später gestand er dieser »Theologie« immerhin gewisse Verdienste zu.

Muss man denn für Hilberts Beweis irgendetwas glauben? Nun ja, den Satz vom ausgeschlossenen Dritten: Eine Aussage ist stets wahr oder falsch, ein Drittes gibt es nicht – selbst dann, wenn sich die Aussage auf unendlich viele

ALLE FOTOS DES ARTIKELS: PUBLIC DOMAIN

David Hilbert (1862–1943) als frisch habilitierter 24-jähriger Privatdozent 1886, als bereits berühmter Professor 1900 und nach seiner Emeritierung 1937

Objekte bezieht und es daher möglicherweise prinzipiell unmöglich ist, ihre Wahrheit oder Falschheit zu ermitteln. Das zu glauben, fällt den Mathematikern im Allgemeinen nicht schwer. Widerspruchsbeweise sind spätestens seit den Zeiten des Euklid (um 360–280 v. Chr.) anerkannte Verfahren. Nur: Dass man aus einer unendlichen Folge unendlicher Mengen jeweils ein Element auswählen kann, auch wenn es kein allgemeines Verfahren für diese Auswahl gibt – das ist nicht so selbstverständlich. Die Mathematiker fühlten sich daher genötigt, den Grundlagen ihrer Wissenschaft als Axiom die Aussage hinzuzufügen, dass dies stets möglich ist. Noch heute denken sie gelegentlich darüber nach, ob man die Mathematik auch ohne das Auswahlaxiom betreiben kann (Spektrum der Wissenschaft 3/2009, S. 54).

Wenige Jahre nach seinem frühen Meisterwerk, 1895, wurde Hilbert auf eine Professur nach Göttingen berufen. Einen pflegeleichten Jungspund habe sich Felix Klein (1849–1925) da vom Pregel an die Leine geholt, hieß es mancherorts. Doch Klein war sehr wohl bewusst, dass es kaum unbequemer ging, aber für die Mathematik in Göttingen auch kaum günstiger.

Hilbert ließ sich von niemandem an die Leine nehmen. Persönliche Befindlichkeiten, Umgangsformen oder kulturelle Normen und Traditionen hatten sich seiner einzigen Herrin, der Mathematik, unterzuordnen. Selbst für seinen eigenen Sohn Franz machte er keine Ausnahme: Nach dessen Nervenzusammenbruch ließ er seine Frau Käthe (1864–1945) mit der Pflege des Jungen allein.

Billard mit dem Untergebenen

Stand dagegen zu erwarten, dass eine Person die Mathematik voranbringen würde, setzte Hilbert sich vorbehaltlos und ohne Ansehen des Geschlechts für sie ein. Sein Einsatz für Emmy Noether (1882–1935) (»Meine Herren, eine Universität ist doch keine Badeanstalt!«, Spektrum der Wissenschaft 8/2004, S. 70) fand allerdings kein Gehör vor den Herren des Universitätssenats. Um ihr dennoch ein minimales Auskommen zu verschaffen, ließ Hilbert sie Vorlesungen halten, die er unter seinem Namen ankündigte.

Hilbert war ein unprofessoraler Professor. Der hagere Gelehrte mit rötlichem Kinnbart und strahlend blauen Augen gab nichts auf Titel und traf sich sogar – unerhört! – mit seinen Assistenten zum Billardspielen in öffentlichen Lokalen. Ganz zuletzt kümmerte ihn die Kleiderordnung. An heißen Tagen erschien er mit kurzärmeligem Hemd und Panamahut auf dem Kopf an der altehrwürdigen Universität zu Göttingen.

Dort vertiefte sich Hilbert in die Zahlentheorie, die »Königin der Mathematik«. Eigentlich geht es in ihr nur um so elementare Dinge wie Teilbarkeit unter ganzen Zahlen oder eben ihr Gegenteil, also die Eigenschaft, eine Primzahl zu sein. Aber in der Wahl der Mittel ist sie nicht so asketisch.

Man erweitert nicht nur die ganzen Zahlen zu den rationalen Zahlen, sondern errichtet darüber noch größere Konstruktionen, so genannte Zahlkörper. In ihnen gibt es wieder spezielle Zahlen, die dort dieselbe Rolle spielen wie die ganzen Zahlen unter den rationalen – mit einer Ausnahme: Die Zerlegung in Primfaktoren ist nicht mehr eindeutig. Um an Struktur zu retten, was zu retten ist, geht man zu verallgemeinerten Zahlen über, den so genannten Idealen. Hilbert bewies, dass alle »ganzen« Zahlen – wie gewünscht – eindeutig in ein Produkt von Primidealen zerfallen. Sein Beweis war nicht der erste dieser Art, doch der eleganteste.

Mit dem neuen Beweis des Satzes von der Primidealzerlegung empfahl sich

Hilbert als Autor des geplanten »Zahlberichts«. Eigentlich hatte die Deutsche Mathematiker-Vereinigung nur eine zusammenfassende Darstellung der damaligen Strömungen der Zahlentheorie in Auftrag gegeben. Doch Hilbert gelang es, die vielen komplizierten Ergebnisse und Methoden zu einer bestechend klaren Theorie zu vereinheitlichen. Seine 1897 vorgelegte Arbeit »Theorie der algebraischen Zahlkörper« gilt noch heute als exzellente Einführung in die Zahlentheorie. Vor allem aber ist das Werk ein literarisches Juwel der Mathematik.

Hilbert war nun endgültig ein Mathematiker von Weltruf. Als er 1900 auf dem Internationalen Mathematikerkongress in Paris 23 mathematische Probleme vortrug, deren Lösung er für besonders dringlich erachtete, fasste eine ganze Generation von Mathematikern das als ein Jahrhundert-Forschungsprogramm auf und machte sich an die Arbeit. Unter den 23 Problemen waren die Kontinuumshypothese (Spektrum der Wissenschaft 3/2009, S. 54), die Widerspruchsfreiheit der Arithmetik (siehe unten), Fermats letzter Satz (Spektrum der Wissenschaft 1/1998, S. 96), die Riemannsche Vermutung (Spektrum der Wissenschaft 9/2008, S. 86) und die Axiomatisierung der Physik. Manche der von ihm aufgeworfenen Fragen sind bis heute offen.

Euklidische Geometrie – neu gefasst

Untrennbar mit Hilberts Namen verbunden ist die axiomatische Methode. Bereits 1899 hatte er sie in seinem Lehrbuch »Grundlagen der Geometrie« herausgearbeitet und damit an die ehrwürdige Tradition des Euklid angeknüpft. Der hatte aus einer geringen Anzahl fast selbstverständlicher Behauptungen, die »eines Beweises weder fähig noch bedürftig sind«, eben den Axiomen, die gesamte klassische Geometrie hergeleitet. Im 19. Jahrhundert experimentierten einige Mathematiker mit Euklids Geometrie und ersetzten deren fünftes Axiom, das berüchtigte Parallelenaxiom, durch ein anderes. Zur allgemeinen Überraschung fanden sich auch innerhalb des neuen Systems keine Widersprüche.

Plötzlich waren Geometrien mit Axiomen möglich, die alles andere als selbstverständlich waren. Dass diese nichteuklidischen Geometrien genauso konsistent sind wie die euklidische, bewies der erwähnte Felix Klein kurz darauf: Ein Widerspruch in der einen Geometrie würde unweigerlich einen Widerspruch in den anderen erzeugen.

Hilbert ging mit seiner Neukonzeption der Axiomatik einen Schritt weiter: Um sich nicht auf die Anschauung als Quelle der Erkenntnis verlassen zu müssen, formalisierte er die Geometrie so radikal, dass die Definitionen der Grundbegriffe sich erübrigen; sie ergeben sich implizit aus den Axiomen. Statt von Punkten, Geraden oder Ebenen könne man ohne Weiteres auch von Tischen, Stühlen oder Bierseideln sprechen; welche Vorstellung die jeweiligen Begriffe begleite, sei belanglos.

Ein Axiomensystem muss nach Hilbert drei Bedingungen erfüllen. Erstens müssen sich alle wahren Sätze aus den Axiomen ergeben (»Vollständigkeit«); zweitens darf keines der Axiome entbehrlich sein, das heißt, die Wegnahme eines Axioms macht die Herleitung mindestens eines wahren Satzes unmöglich (»Unabhängigkeit«); und drittens darf aus den Axiomen kein Widerspruch folgen (»Widerspruchsfreiheit«).

Für die Widerspruchsfreiheit der euklidischen Geometrie griff Hilbert auf die Algebra der Zahlkörper zurück. Mit ihrer Hilfe zeigte er, dass die Anwendung seiner Axiome zu keinem Widerspruch führt, wenn die Arithmetik der reellen Zahlen widerspruchsfrei ist. Die Widerspruchsfreiheit der Geometrie ist geknüpft an die der Arithmetik.

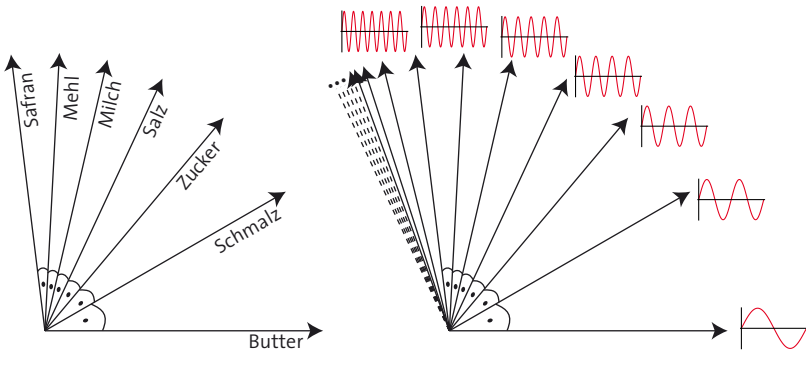
Der tägliche Spaziergang in die umliegenden Wälder war für Hilbert zum Ritual geworden, an dem sich ausgewählte Studenten und Kollegen beteiligen durften. Körperliche Bewegung för-

Backe, backe, Obertöne ...

Die Menge aller Kuchenrezepte entspricht geometrisch einem endlich-dimensionalen Raum, da es nur endlich viele (im Beispiel links: sieben) verschiedene Zutaten gibt. Bereits sieben Achsen, von denen jeweils zwei aufeinander senkrecht stehen, überfordern unser Vorstellungsvermögen (links); aber man rechnet mit ihnen im Prinzip nicht anders als mit den vertrauten drei Raumdimensionen.

Dagegen entspricht die Menge aller Klänge zu einem gegebenen Grundton einem unendlich-dimensionalen Raum, denn es gibt im Prinzip unendlich viele Obertöne. Auch in diesem Raum kann man noch Koordinatenachsen definieren, die sämtlich aufeinander senkrecht stehen (rechts). Man ist nur nicht mehr frei, diesen Koordinaten beliebige Werte zuzuweisen. Vielmehr muss die Summe über die (unendlich vielen) Quadrate der Koordinatenwerte endlich sein. Diese Summe entspricht physikalisch der Energie des Schallsignals.

Ein Hilbert-Raum ist ein unendlich-dimensionaler Raum, in dem eine Geometrie definiert ist (so dass man von rechten Winkeln sprechen kann) und alle Elemente endliche Energie haben.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Der Mathematische Verein zu Göttingen im Jahr 1902. Rechts von Hilbert (vorderste Reihe, Dritter von links) sitzt sein Förderer Felix Klein, ganz rechts in der vordersten Reihe Ernst Zermelo (1871–1953), der wenige Jahre später eine axiomatische Grundlegung der Mengenlehre – mit dem Auswahlaxiom – formulierte.

derte seine gedankliche Beweglichkeit – davon war zumindest er selbst überzeugt. So zählte Hilbert zu den ersten Schiläufern in Göttingen. Auf den importierten Brettern bahnte er sich winters des Öfteren seinen Weg an die Universität. Dann stolperte er mit den riesigen norwegischen Stiefeln an den Füßen auf das Pult im Hörsaal zu, bereits hörbar in die Vorlesung vertieft.

Auch zu den Pionieren des Radfahrens muss man Hilbert rechnen. Das Fahrrad stand griffbereit im Garten, wo er seinen mathematischen Gedanken nachhing, während er den Boden umgrub, Samen aussäte und Unkraut jätete. Von der überdachten Tafel, die Hilbert an der Wand des Nachbarhauses angebracht hatte, löste er sich manchmal unvermittelt, drehte ein paar Runden um die kreisförmig angelegten Rosenbeete, warf das Fahrrad in den Kies und kehrte zur Tafel zurück.

Dort prangten derweil vor allem Epsilons und Deltas sowie Summen- und Integralzeichen. Hilbert hatte sich der Analysis zugewandt. Heute zählen die »Hilbert-Räume« zum Standardinventar der Mathematiker – und Physiker. Ein Hilbert-Raum verallgemeinert den Raum der euklidischen Geometrie auf unendlich viele Dimensionen. Zwei reelle Zahlen repräsentieren einen Punkt in der Ebene, drei einen Punkt im dreidimensionalen Raum; ein n-dimensionaler Raum besteht entsprechend aus Punkten, die durch n reelle Zahlen beschrieben werden. In einem Hilbert-Raum hat ein Punkt jedoch unendlich viele Koordinaten oder ist gar eine reelle Funktion. Damit man da überhaupt noch Geometrie betreiben kann, müssen gewisse Grenzwerte existieren, was alles andere als trivial ist (Kasten links).

Wider den Hurrapatriotismus

Einen Ausgleich zu seinen tiefgründigen Überlegungen fand Hilbert in der Damenwelt. Der Doyen der Mathematik war ein stadtbekannter Schürzenjäger. War er mal wieder für ein weibliches Wesen entbrannt, egal ob Studentin oder Kollegengattin, sah man ihn gut gelaunt durch Göttingens Straßen schlendern, mit einem Strauß Blumen im Arm. Gerne lud er die Damen auch zu einer seiner zahlreichen Tanzabenden zu sich nach Hause. Ehefrau Käthe nahm es mit Humor. Als Studenten einmal das Alphabet aus den Anfangsbuchstaben der Namen von Hilberts Flammen zimmerten und bei K ins Stocken gerieten, brachte sie mit gespielter Empörung ihren Namen ins Spiel.

Dem internationalen Geist der Mathematik lief eine nationalistische Dummheit wie der Erste Weltkrieg aufs Äußerste zuwider. Hilbert hielt nichts vom Krieg und sagte das auch öffentlich. Als bedeutende deutsche Künstler und Wissenschaftler ein Dokument aufsetzten, in dem sie dem Kaiser ihre Unterstützung zusicherten und bestritten, dass das Deutsche Reich den Krieg begonnen und die Neutralität Belgiens verletzt habe, verweigerte Hilbert als einer der wenigen Gelehrten seine Unterschrift.

Mitten im Krieg, im Juni 1915, referierte Albert Einstein (1879–1955) vor den Göttinger Mathematikern über eine Differenzialgleichung, die zum Herzstück seiner allgemeinen Relativitätstheorie werden sollte. Eine intensive Zusammenarbeit mit Hilbert schloss sich an. Am 25. November desselben Jahres erschien Einsteins entscheidende Arbeit; fünf Tage zuvor hatte Hilbert dazu äquivalente Gleichungen zur Veröffentlichung eingereicht.

Dieses Zusammentreffen löste einen Prioritätsstreit aus – unter Wissenschaftshistorikern; Hilbert und Einstein hatten damit kein Problem. Der Mathematiker räumte freimütig dem Physiker ein, der Erste gewesen zu sein, der auf die richtigen Koeffizienten gekommen sei. Hilbert genügte, dass er sie unter Benutzung des Variationsprinzips herleiten konnte.

Nach dem Ersten Weltkrieg blühte die Göttinger Mathematik rasch wieder auf, und die Universität wurde zur Pilgerstätte für Mathematiker aus aller Welt. Tauchten in den entferntesten Winkeln bedeutende Ideen auf, wollte Hilbert darüber sofort eine Vorlesung halten. Dazu mussten seine Assistenten sich in den Stoff einlesen und ihn ihrem Chef sorgfältig erklären. Häufig machte sich Hilbert unmittelbar nach dem Gespräch auf in den Hörsaal. Dann endeten die Vorlesungen regelmäßig im Fiasko, weil Hilbert eigene Ideen in die neuen Theorien einbrachte, ohne

Das Ehepaar Hilbert in den 1890er Jahren

deren Details präsent zu haben. Gleichwohl war der Hörsaal regelmäßig überfüllt; einige Studenten kauerten gar auf den Fenstersimsen.

Kurz nach dem Krieg sah Hilbert die Zeit gekommen, die Mathematik auf ein unerschütterliches Fundament zu stellen, und das hieß: die Widerspruchsfreiheit der Arithmetik zu beweisen. Die axiomatisierte Physik ist widerspruchsfrei, wenn es die Geometrie ist, und die Geometrie ist widerspruchsfrei, wenn es die Arithmetik ist. Auf ihr lag damit die ganze Beweislast, und es gab nichts Außermathematisches, auf das sie diese Last hätte abstützen können, denn die Mathematik akzeptiert keine Voraussetzungen außerhalb ihrer selbst.

Was aber zu deren Inventar gehört, war durchaus umstritten. Der Niederländer Luitzen Brouwer (1881–1966) stieß sich vor allem am eingangs erwähnten Prinzip vom ausgeschlossenen Dritten, wonach eine Aussage schon dann als wahr anzunehmen ist, wenn ihre Negation in einen Widerspruch führt. Vielmehr müsse ein Existenzbeweis für ein Objekt zumindest eine Konstruktionsvorschrift liefern.

Nach dem »Intuitionismus« Brouwers wäre nicht nur Hilberts gefeierter Beweis seines Endlichkeitssatzes unzulässig. Entrüstet gab dieser zu Protokoll, das Verbot des Widerspruchsbeweises bedeute dasselbe, wie einem Boxer den Gebrauch seiner Fäuste zu verbieten.

Hilbert antwortete auf die Herausforderung mit einem gewaltigen Programm, der Beweistheorie. In ihr machte er die Beweise selbst zum Gegenstand der mathematischen Untersuchung. Man formalisiere sämtliche Sätze der Mathematik mitsamt ihren Beweisen: Jede mathematische Aussage einschließlich der Axiome ist eine Kette von Zeichen; ein Beweisschritt ist eine zulässige Umformung einer solchen Zeichenkette; der Beweis einer Aussage besteht in einer Kette zulässiger logischer Schlüsse – sprich Umformungen –, die von den Axiomen zu der Aussage führt. Die Überprüfung der Zulässigkeit könne ohne Ansehen der Bedeutung der Aussagen von einer Maschine erledigt werden, sagte Hilbert – lange bevor es Computer gab, die dazu fähig gewesen wären.

Insbesondere müsste die Widerspruchsfreiheit eines formalen Systems wie der Arithmetik grundsätzlich in endlich vielen Schritten beweisbar sein. Damit wäre die gesamte Mathematik gerettet und ihre Grundlagen ein für alle Mal gelegt.

Doch dem Programm blieb der krönende Abschluss versagt. Noch zu Hilberts Lebzeiten zeigte der polnische Logiker Alfred Tarski (1901–1983), dass formale Widerspruchsfreiheit nicht mit inhaltlicher Wahrheit identifiziert werden kann, denn im Allgemeinen folgt aus dem einen nicht das andere. Ebenfalls in den 1930er Jahren wies Kurt Gödel (1906–1978) nach, dass Vollständigkeit und Widerspruchsfreiheit eines Axiomensystems mit dessen eigenen Mitteln nicht beweisbar sind.

Gödels Unvollständigkeitssatz war ein schwerer Rückschlag für Hilbert. Doch seine Zuversicht ließ er sich nie nehmen. Selbst als die Ärzte 1925 bei ihm Anämie diagnostizierten und ihm nur noch wenige Monate zu leben gaben, bestand Hilbert darauf, es müsse eine andere ungefährliche Krankheit mit denselben Symptomen sein. Zwar war Hilbert einer der ersten Patienten, die ein gegen die Blutarmut entwickeltes Leberpräparat verabreicht bekamen, doch am Ende war es wahrscheinlich eine Bluttransfusion, die ihm das Leben rettete. Der Spender war ausgerechnet Kleins Nachfolger Richard Courant (1888–1972).

Weit schwerer wog der Schlag, den die Nationalsozialisten der Mathematik verpassten. Sie verleumdeten, vertrieben und ermordeten die kreativsten Köpfe. Es wurde still um Hilbert. Befragt, wie an seiner Universität die Mathematik gedeihe, nachdem sie vom jüdischen Einfluss befreit worden sei, antwortete Hilbert: »Die Mathematik in Göttingen, die gibt es nicht mehr.«

Das Ende des Zweiten Weltkriegs erlebte Hilbert nicht mehr. Er starb vereinsamt am 14. Februar 1943 an den Folgen eines Sturzes beim Spazierengehen. Kaum ein Dutzend Trauergäste kam zu seiner Beerdigung. Seine halb erblindete Frau ließ in den Grabstein die letzten Worte Hilberts meißeln, die er gesprochen hatte, als ihm seine Geburtsstadt Königsberg 1930 die Ehrenbürgerschaft verlieh: »Wir müssen wissen. Wir werden wissen.«

DER AUTOR

Marc Dressler ist promovierter Philosoph und Wissenschaftsjournalist in Stuttgart (www.inspective.de).

QUELLEN

Corry, L.: Modern Algebra and the Rise of Mathematical Structures. Birkhäuser, Basel 2004

Freudenthal, H.: Hilbert, David. In: Neue Deutsche Biographie 9, 1972, S. 115–117. Online unter www.deutsche-biographie.de/pnd11855090X.html

Hilbert, D.: Gesammelte Abhandlungen. Springer, Berlin 1935. Online unter http://gdz.sub.uni-goettingen.de/dms/load/toc/?PPN=PPN237820250

Hilbert, D., Ackermann, W.: Grundzüge der theoretischen Logik. Springer, Berlin, 6. Auflage 1972

Reid, C.: Hilbert. Springer, New York 1996

Sommer, K.: Wer entdeckte die Allgemeine Relativitätstheorie? In: Physik in unserer Zeit 36, S. 230–235, 2005

Wußing, H., Arnold, W. (Hg.): Biographien bedeutender Mathematiker. Volk und Wissen, Berlin, 4. Auflage 1994

WEBLINKS

Roquette, P.: David Hilbert in Königsberg. Vortrag vom 30.9. 2002. www.rzuser.uni-heidelberg.de/~ci3/vortrag.pdf

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1124696

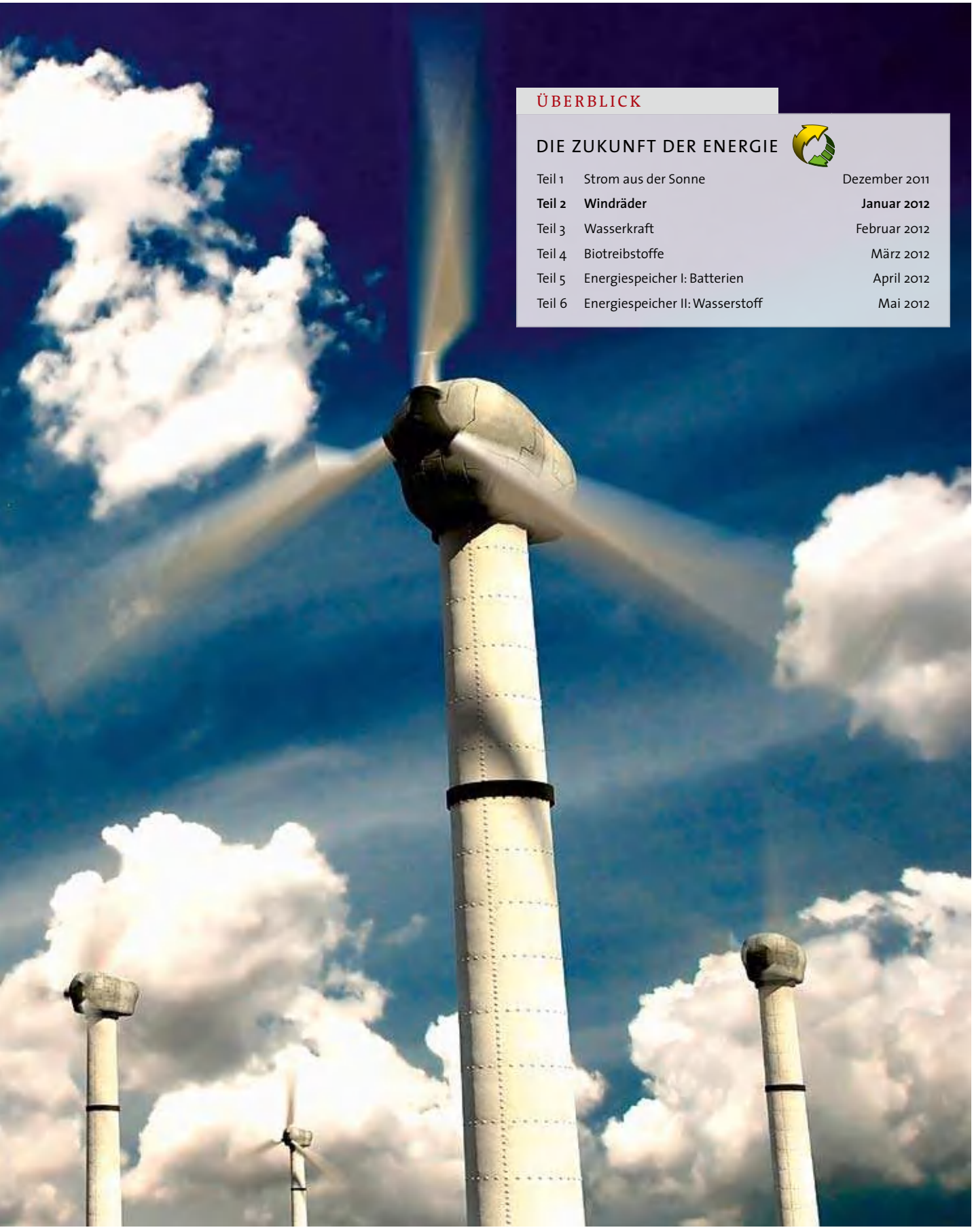
SERIE ENERGIE | TEIL 2

Frische Brise

Die Windenergiebranche erlebt weltweit ein rasantes Wachstum. In nicht allzu ferner Zukunft könnte Windkraft sogar zur tragenden Säule der globalen Stromversorgung werden. Auch die Speichertechnologie bekommen Wissenschaftler zunehmend in den Griff. Noch fehlt es aber an hinreichend leistungsfähigen Stromnetzen.

Von Gerhard Samulat

Windenergie deckt derzeit etwa zehn Prozent des Strombedarfs Deutschlands.



DREAMSTIME / NMEDIA

ÜBERBLICK

DIE ZUKUNFT DER ENERGIE

Teil 1	Strom aus der Sonne	Dezember 2011
Teil 2	**Windräder**	**Januar 2012**
Teil 3	Wasserkraft	Februar 2012
Teil 4	Biotreibstoffe	März 2012
Teil 5	Energiespeicher I: Batterien	April 2012
Teil 6	Energiespeicher II: Wasserstoff	Mai 2012

Es ist beeindruckend, was die Forscher um Michael B. McElroy von der Harvard University (Cambridge, Massachusetts) ausgerechnet haben: Ihrer Studie zufolge lässt sich mit Windkraftanlagen eine Leistung erzielen, die mehr als dem 40-Fachen des derzeitigen globalen Bedarfs an elektrischer Energie entspricht. Dies würde selbst dann gelten, wenn ausschließlich mittelgroße Windräder einer Leistung von 2,5 Megawatt auf ökologisch unbedenklichen Landstrichen aufgestellt würden und wenn sie 80 Prozent der Zeit stillstünden. Die größte kommerzielle Windkraftanlage der Welt, die Enercon E-126, bringt es jedoch heute bereits auf eine Nennleistung von 7,5 Megawatt – ausreichend, um gut 10 000 Haushalte mit Strom zu versorgen. Und der US-amerikanische Anlagenhersteller General Electric will in den kommenden Jahren sogar eine Turbine mit supraleitender Technik entwickeln, die eine Leistung von 10 bis 15 Megawatt liefern soll. Wenngleich: Die durchschnittliche Auslastung deutscher Windkraftanlagen betrug in den vergangenen zehn Jahren etwa 17 Prozent. Das heißt, die Anlagen standen die meiste Zeit still. Trotzdem ist der Nachschub an Windenergie, angetrieben durch den Lauf der Sonne, nach menschlichem Ermessen unerschöpflich.

Nach Angaben der World Wind Energy Association (WWEA), einem internationalen Dachverband zur Förderung der Windenergie, hängen zurzeit Windkraftanlagen mit einer weltweiten Gesamtleistung von 215 Gigawatt an den Stromnetzen. Sie decken etwas mehr als zwei Prozent des globalen Stromverbrauchs ab. Dieser Anteil nimmt jedoch zu, denn die Windenergie ist eine schnell expandierende Wirtschaftsbranche: Sie wächst um mindestens 20 Prozent pro Jahr. So rechnet die WWEA in diesem Jahr mit einem Zubau von fast 44 Gigawatt – jede Woche kommt also etwa die Leistung eines großen Kraftwerks hinzu. Und der Global Wind Energy Council, ein Industrieverband, prognostiziert sogar, dass die Windenergie im Jahr 2030 bereits 25 bis 30 Prozent des weltweiten Stromverbrauchs decken könnte. Zu ähnlichen Schlüssen kommt das US-Energieministerium.

Mit insgesamt fast 45 Gigawatt erzeugen mittlerweile die Chinesen am meisten Windstrom. An zweiter Stelle stehen die USA, noch vor Deutschland, Spanien und Indien. Die Volksrepublik China ist zugleich der Markt, der den größten Zuwachs an Windenergie für sich verbucht: Fast die Hälfte der Leistung, die 2010 weltweit neu installiert wurde, entfiel auf die aufstrebende Nation in Fernost. Deutschland, obgleich einer der Pioniere der Branche, kam im selben Zeitraum auf weniger als ein Zehntel der chinesischen Zuwachsrate.

Trotzdem deckt die Bundesrepublik bereits etwa zehn Prozent ihres Strombedarfs mit der Kraft bewegter Luft. Fast 22 000 Windenergieanlagen drehten sich Ende 2010 in Deutschland. Sie können bei voller Auslastung insgesamt 27 Gigawatt erzeugen, was nahezu dem minimalen Strombedarf der Bundesrepublik entspricht: Derzeit schwankt die Nachfrage im Jahresverlauf zwischen 30 und 80 Gigawatt. Zwar sind die Anlagen nie alle gleichzeitig voll ausgelastet. Doch der nationale Aktionsplan für erneuerbare Energie der Bundesregierung geht davon aus, dass im Jahr 2020 allein Windenergie- und Fotovoltaikanlagen mit einer Gesamtnennleistung von etwa 98 Gigawatt in Deutschland am Netz sein werden, mit etwa der Hälfte davon aus Windturbinen. Diese Zahlen zeigen, dass Wind zusammen mit der Fotovoltaik künftig immer häufiger den aktuellen Strombedarf vollständig decken kann.

Obwohl 2010 ein ungewöhnlich windschwaches Jahr in Deutschland war, entfiel mehr als ein Drittel des regenerativ erzeugten Stroms auf die Windenergie, die damit bedeutendste erneuerbare Energiequelle der Bundesrepublik. Windkraftanlagen dürften auch weiterhin den größten Beitrag zum Ausbau der erneuerbaren Energien leisten. Zumal sich die Bundesregierung dafür einsetzt, dass vor deutschen Küsten so genannte Offshore-Windparks errichtet werden – also Anlagen auf See, die im Jahr 2030 noch einmal so viel Leistung erbringen sollen wie jetzt die Anlagen auf dem Land.

Die Erzeugung von Windstrom kostet nach Angaben des Bundesverbands Windenergie derzeit durchschnittlich 6,4 Cent pro Kilowattstunde, bei besten Windverhältnissen an der Küste etwa 4,5 Cent. Das liegt unterhalb der Preise, die man auf dem so genannten Spotmarkt der Leipziger Strombörse zahlen muss. Es ist sogar schon mehrfach vorgekommen, dass ein Überangebot an Windstrom den Preis für Elektrizität an der Leipziger Strombörse für einige Zeit unter null drückte. Nach Berechnungen der Fraunhofer-Gesellschaft vermeidet jede Megawattstunde Windstrom den Ausstoß von etwa einer Tonne des Treibhausgases Kohlendioxid. Hochgerechnet auf die Gesamtproduktion des Windenergiesektors in Deutschland entspricht das einer Einsparung von 32 Millionen Tonnen CO_2.

Im Grunde ist die Technik von Windenergieanlagen sehr alt. Vermutlich gab es in Babylon schon vor mehr als 3500 Jahren Windmühlen, die Getreide mahlten oder Wasser schöpften. 1887 errichtete der Schotte James Blyth die erste Anlage zur Stromerzeugung. Nur wenige Jahre später entwickelte der dänische Meteorologe Poul La Cour das Konzept des modernen Schnellläufers, der nur wenige Rotorblätter besitzt, die sich dafür aber rasch drehen. Um 1920 zeigte der deutsche Physiker Albert Betz, dass sich mit einer Windkraftanlage maximal rund 60 Prozent (exakt: 16/27) der Leistung

AUF EINEN BLICK

STÜRMISCHE ZEITEN

1 Die Windenergie verzeichnet enorme Wachstumsraten; viele Länder investieren in neue **Kraftwerkparks**. Schon heute leisten **Windräder** in einigen Ländern einen bedeutenden Anteil zur Energieversorgung.

2 Experten zufolge hat die Windenergie genug Potenzial, um den weltweiten Strombedarf zu decken – trotz **schwankender Auslastung**.

3 Um sie zu einer tragenden Säule der Energieversorgung zu machen, sind aber noch einige Herausforderungen zu bewältigen, etwa der Aufbau eines **kontinentübergreifenden Stromverbundnetzes** sowie einer geeigneten **Infrastruktur für Speicher**.

des Windes nutzbringend umwandeln lassen. Dazu muss die Luft gleichmäßig durch die gesamte Rotorfläche auf etwa ein Drittel ihrer vorherigen Geschwindigkeit gebremst werden. Das erreichen die Ingenieure heute durch eine nach außen abnehmende Profiltiefe der Rotorblätter.

Weltweit haben sich Windräder mit horizontaler Drehachse durchgesetzt. Ihre Blätter sind den Flügeln von Flugzeugen nachempfunden und setzen die Luftströmung mittels aerodynamischen Auftriebs in eine Rotationsbewegung um. Drei Rotorblätter haben sich dabei als mechanisch am stabilsten erwiesen und sind schwingungstechnisch einfacher zu beherrschen als Zwei- oder Vierblattrotoren. Sehr schnell laufende Windräder mit zwei oder gar nur einem Blatt besitzen zudem einen deutlich geringeren aerodynamischen Auftrieb, so dass sie den Wind wesentlich schlechter »abernten«. Außerdem nimmt der Lärm, den die Anlagen verursachen, mit steigender Blattgeschwindigkeit stark zu – ein weiteres Argument gegen Ein- oder Zweiblattrotoren.

Flügelräder in schwindelnden Höhen

Die Rotordurchmesser liegen bei den heute üblichen Anlagen zwischen 40 und 90 Metern. Aktueller Spitzenreiter ist die Enercon E-126 mit 127 Metern und einer Nabenhöhe von 135 Metern. Das dänische Unternehmen Vestas hat aber bereits angekündigt, eine Anlage mit 164 Meter Durchmesser auf den Markt zu bringen. Solche Dimensionen lassen sich mit glasfaserverstärkten Kunststoffen erreichen, aus denen Rotorblätter heute oft bestehen. Diese sind zwar etwas schwerer und biegsamer als kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe, die Flugzeugbauer verwenden, aber auch billiger.

Meist werden die Rotoren aus Halbschalen zusammengefügt, mit stabilisierenden Versteifungsholmen und -stegen im Innern des Blatts. Noch herrscht Handarbeit vor, obwohl die Produktion in Teilen automatisiert ist. Oft bauen die Hersteller gleich eine Heizung in die Rotorblätter ein, um zu verhindern, dass diese an kalten und feuchten Tagen vereisen. Nach wie vor entwickeln Forscher und Ingenieure die Technik weiter, wobei sie unter anderem versuchen, die Aerodynamik der Rotorblätter zu verbessern und deren Gewicht zu verringern. Dabei hat sich zum Beispiel gezeigt, dass es aerodynamische Vorteile mit sich bringt, die Profiltiefe im mittleren Bereich des Rotorblatts zu reduzieren.

Windräder erzeugen Lärm, wenn sie sich drehen – ein häufig kritisierter Punkt. Daher ist es eines der wichtigsten Ziele bei ihrer Weiterentwicklung, die Schallemissionen zu vermindern. Anlagen mit mehr als 50 Meter Höhe sowie Windparks dürfen in Deutschland nur so viel Lärm erzeugen, dass ihr Dauerschallpegel nachts in Wohngebieten 35 Dezibel nicht überschreitet. Hierzu lässt sich die Drehzahl der Rotoren vermindern, so dass sie in einem »Flüsterbetrieb« fahren. Auch die optische Belästigung durch Windräder wird gesetzlich berücksichtigt. So müssen manche Anlagen zu bestimmten Tageszeiten abgeschaltet werden, weil der flackernde Schatten, den sie bei tiefem Sonnenstand werfen,

Natur
Energie
Plus

Mit der Natur auf einer Welle.

In den letzten zwölf Monaten haben sich über 20.000 Bürger für Strom aus 100 % Wasserkraft von NaturEnergiePlus entschieden. Wann wechseln Sie zum Strom aus sauberer Quelle?

→ Jetzt wechseln!

www.naturenergieplus.de

als störend empfunden werden kann. Höchstens eine halbe Stunde pro Tag und 30 Stunden pro Jahr darf ein solcher »Flatterschatten« hier zu Lande auf Wohnhäuser fallen.

Einer der wichtigsten Einwände, den Naturschützer gegen Offshore-Windparks vorbringen, ist der Geräuschpegel während der Bauphase. Wenn die Fundamente in den Boden gerammt werden, beträgt der Schallpegel teils mehr als 200 Dezibel. Das ist weit oberhalb der Schmerzgrenze. Deshalb achten die Arbeiter darauf, die Intensität der Rammstöße auf niedrigem Niveau zu beginnen und dann langsam zu erhöhen, so dass Tiere rechtzeitig das Weite suchen können. Zudem arbeiten Ingenieure an leiseren Alternativen, etwa dem Bohren oder Einspülen der Fundamente. Vielleicht wird man künftig sogar vollkommen darauf verzichten können, massive Fundamente im Meeresboden einzugraben: Erste Unternehmen entwickeln schwimmende Offhore-Anlagen, die an der gewünschten Stelle ankern. Sie könnten an besonders windigen Standorten über sehr tiefen Gewässern arbeiten.

Gefahr für Vögel ist relativ klein

Auch an Land können von Windrädern Gefahren für die Tierwelt ausgehen. Studien zeigen, dass immer wieder Vögel oder Fledermäuse mit den Rotorblättern zusammenstoßen. Die Untersuchungen sind allerdings lückenhaft und liefern sehr unterschiedliche Ergebnisse: Während einige Windparks keine Zusammenstöße verzeichnen, kommen in anderen mehr als 50 Vögel pro Jahr an einem einzigen Rotor ums Leben. Eine Studie des Naturschutzbunds Deutschlands (NABU) von 2004 lässt darauf schließen, dass in Deutschland jährlich etwa 200 000 Vögel bei Kollisionen mit Windkraftanlagen sterben. Demgegenüber stehen fünf bis zehn Millionen Vögel, die durch Straßenverkehr oder Stromleitungen getötet werden, wie der Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND) schätzt. Fledermäuse brauchen noch nicht einmal einen direkten Kontakt, um an Windkraftanlagen zu verunglücken; durch den rasch wechselnden Luftdruck an den Rotorblattenden können sie ein so genanntes Barotrauma erleiden. Der NABU-Studie von 2004 zufolge wurden innerhalb von sechs Jahren in ganz Deutschland 250 Fledermäuse gefunden, die an Windkraftanlagen zu Tode gekommen waren.

Windenergieanlagen erreichen, wie alle Maschinen, nie das theoretisch mögliche Maximum. Ihr Wirkungsgrad sinkt etwa durch die Reibung der Luft an den Rotorblättern sowie durch Wirbelschleppen an den Blattspitzen. Bei modernen Anlagen reduzieren solche Verluste den so genannten Leistungsbeiwert auf 0,4 bis 0,5 – das heißt, mehr als die Hälfte der Strömungsenergie streicht ungenutzt am Rotor vorbei. Beträgt die Leistungsdichte des Winds 320 Watt pro Quadratmeter, was einer Windgeschwindigkeit von acht Metern pro Sekunde entspricht, dann überträgt die Anlage maximal 160 Watt pro Quadratmeter auf den Generator, der die mechanische Energie des Winds in elektrischen Strom umwandelt.

Die Leistung einer Windkraftanlage steigt jedoch nahezu exponentiell mit dem Durchmesser des Rotors. Deshalb

Alternative Windkraftanlagen

WINDRÄDER MIT VERTIKALEN ACHSEN

Windkraftanlagen lassen sich auch mit vertikaler Drehachse konstruieren, wenngleich dieser Typ derzeit einen geringen Marktanteil hat. Am weitesten verbreitet sind Darrieus-Rotoren. Sie büßen selbst bei stark turbulentem Wind nur wenig Wirkungsgrad ein. Allerdings stehen ihre Rotorblätter immer nur kurze Zeit optimal zur Luftströmung, wodurch ihre Leistungsbeiwerte maximal 0,3 erreichen, verglichen mit 0,4 bis 0,5 bei herkömmlichen Windrädern. Ferner belastet das ständige Herausdrehen der Flügelprofile aus der Hauptwindrichtung die Konstruktion, wodurch es zu störenden Schwingungen kommen kann. Der Rotor muss aber nicht dem Wind nachgeführt werden.

Die größte Windkraftanlage mit vertikaler Achse war der 1988 errichtete Éole in Le Nordais, Kanada. Der Rotor hatte einen Durchmesser von 64 Metern und war 110 Meter hoch. Bis zu seiner Stilllegung im Jahr 1992 nach schwerem Schaden durch eine Sturmböe leistete er knapp vier Megawatt, was zur Versorgung von rund 800 Einfamilienhäusern reichte.

Ein weiterer Windgenerator mit vertikaler Achse ist der Savonius-Rotor. Man findet ihn auf Segeljachten, wo er Funkanlagen oder andere Geräte mit Strom versorgt, und in Flugzeugen, wo er als Notaggregat Strom aus dem Fahrtwind gewinnt, falls die Triebwerke versagen. Er ist aber, unter anderem wegen seines niedrigen Leistungsbeiwerts, kaum zur wirtschaftlichen Stromerzeugung geeignet.

AUFWINDKRAFTWERKE

Ein Aufwindkraftwerk ähnelt einem Turm, der aus einem riesigen Treibhaus herausragt. Bei Sonneneinstrahlung erhitzt sich in dem Treibhaus die Luft und steigt anschließend im Turm auf, wobei sie teils orkanartige Geschwindigkeiten erreicht. Turbinen entziehen diesem Wind Energie und erzeugen Strom.

Ende der 1970er Jahre baute der deutsche Ingenieur Jörg Schlaich in Spanien die erste Pilotanlage. Ihr Turm war 195 Meter hoch, und der Radius des Treibhauses betrug 122 Meter. Die

W. WACKER / PUBLIC DOMAIN

Darrieus-Rotor auf einem Testfeld nahe dem baden-württembergischen Heroldstatt. Dieser Anlagentyp hat eine vertikale Drehachse und muss dem Wind nicht nachgeführt werden. Jedoch strömt die Luft die Rotorblätter ständig aus einer anderen Richtung an, während sich das Rad dreht, was die Effizienz senkt.

SCHLAICH BERGERMANN SOLAR, STUTTGART
WWW.SOLAR-UPDRAFT-TOWER.COM

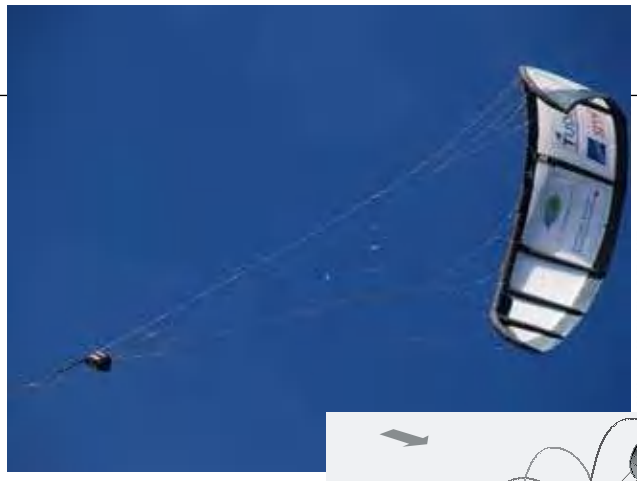
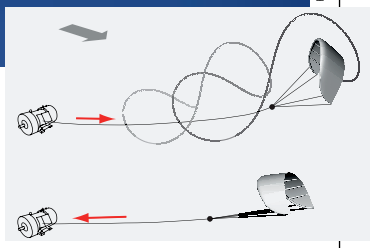


FOTO UND GRAFIK: TU DELFT, ASSET



Künstlerische Darstellung eines Aufwindkraftwerks (oben links). Solche Kraftwerke sind sehr groß und belegen viel Fläche. Sie sind deshalb in der Anschaffung teuer, sollen bei hinreichend großer Auslegung aber billigen Strom liefern. Auch mit Gleitsegeln und Lenkdrachen (oben rechts) lässt sich elektrischer Strom gewinnen. Sie schrauben sich an einer Leine in die Luft und treiben dabei einen Generator an. Anschließend werden sie mit geringer Kraft wieder eingeholt (Grafik rechts).

Anlage war für eine Spitzenleistung von 50 Kilowatt ausgelegt, die sie während der mehrjährigen Projektlaufzeit aber nur kurz erreichte. Ansonsten lief die Anlage fast störungsfrei mit einer Verfügbarkeit von über 95 Prozent.

Für eine 200-Megawatt-Anlage müsste der Turm einen Kilometer hoch sein und das Treibhaus einen Radius von 3,5 Kilometern besitzen, was mit hohen Investitionskosten verbunden wäre. Allerdings lägen die Stromgestehungskosten bei Aufwindkraftwerken dieser Größe wohl niedriger als bei ähnlich leistungsfähigen Solarthermiekraftwerken: aktuellen Schätzungen zufolge bei etwa 8 Cent pro Kilowattstunde, während die von Rinnen- oder Turmkraftwerken mit 15 bis 23 Cent angegeben werden. Da der Boden die Wärme speichert, können Aufwindkraftwerke zudem bis spätabends oder sogar nachts Strom erzeugen.

In der Volksrepublik China ging kürzlich ein erstes Aufwindkraftwerk mit einer Leistung von 200 Kilowatt in Betrieb. In Namibia soll eine 400-Megawatt-Anlage mit knapp 38 Quadratkilometer Treibhausfläche und einem mehr als 1500 Meter hohen Turm errichtet werden. Weitere Projekte sind in den USA und in Spanien geplant.

FALLWINDKRAFTWERKE

Fallwindkraftwerke ähneln Aufwindkraftwerken: Sie haben auch einen hohen Turm, verzichten allerdings auf das Treibhaus, das bei Aufwindkraftwerken bis zu 80 Prozent der Baukosten verursachen kann. Stattdessen sprüht man oben am Turm Wasser in die Luft. Dessen Verdunstung kühlt die Luft ab, wodurch ihre Dichte zunimmt, so dass sie nach unten fällt. Am Fuß des Turms befinden sich Turbinen, die vom Luftstrom angetrieben werden. Türme mit 1200 Meter Höhe und 400 Meter Durchmesser sollen Leistungen bis zu 900 Megawatt erreichen. Etwa ein Drittel der erzeugten Elektrizität müsste jedoch gleich wieder investiert werden: für die Pumpen, die das Wasser nach oben befördern.

Trockene Wüstengebiete sind die besten Standorte für diese Anlagen. Da viele Wüsten zugleich an Meere grenzen – etwa die Sahara, die Namib oder die Atacama –, gibt es dort oft auch genügend Wasser. Fallwindkraftwerke arbeiten ferner tags und nachts mit relativ ausgeglichener Leistung.

Noch gibt es keine Pilotkraftwerke dieses Typs, Vorarbeiten laufen aber in den USA und in Israel. Fachleute schätzen, dass der von Fallwindkraftwerken erzeugte Strom etwa 2,5 Cent pro Kilowattstunde kosten würde. Das wäre vergleichsweise günstig – falls diese Kraftwerke denn jemals gebaut würden.

LENKDRACHEN UND GLEITSEGEL

Auch mit Hilfe von hoch fliegenden Lenkdrachen oder Gleitsegeln lässt sich Energie gewinnen. Seit einiger Zeit existieren Prototypen dazu. An einer langen Leine schraubt sich das Segel in die Luft, wobei die abrollende Leine einen Generator antreibt. Ist das Seil vollständig abgewickelt, wird der Flugwinkel des Drachens so verändert, dass er sich mit deutlich weniger Kraft wieder einholen lässt. Unterm Strich bleibt ein Energiegewinn. Drachen mit einer Fläche von 14 Quadratmetern haben eine mechanische Zugleistung von etwa 20 Kilowatt, die sich zum Teil in elektrische Energie umwandeln lässt. Bei einem Segel des Unternehmens SkySails, das eine Fläche von 320 Quadratmetern besitzt und zum Ziehen von Schiffen eingesetzt wird, beträgt dieser Wert mehr als zwei Megawatt. Einige Forscher wollen die Segel zudem in Schwärmen aufsteigen lassen.

Geplant sind Flughöhen von mehreren hundert Metern, weil dort die Winde sehr konstant blasen. Lenkdrachen und Gleitsegel seien in Bau und Unterhalt deutlich günstiger als Windparks, rechnet eine niederländische Forschergruppe vor. Verschiedene Studien schätzen die Stromgestehungskosten auf 2 bis 4 Cent pro Kilowattstunde – deutlich weniger als bei Windrädern. Ein weiterer Vorteil von Gleitsegelkraftwerken: Sie sind mobil, beanspruchen wenig Platz und können flexibel dort eingesetzt werden, wo gerade Strom benötigt wird. Allerdings müssen sie bei Sturm oder Gewitter ihre Arbeit einstellen. 2013 soll ein erstes Kraftwerk mit einem Megawatt Leistung auf den Markt kommen.

kann ein um zehn Prozent niedrigerer Leistungsbeiwert bereits durch eine fünfprozentige Erhöhung des Rotordurchmessers ausgeglichen werden – der Grund, warum die Hersteller immer größere Maschinen bauen. Auch die Höhe des Turms spielt eine wichtige Rolle, da die Luft mit steigendem Abstand zum Boden meist stärker und gleichmäßiger weht.

Vor allem aber nimmt der Ertrag der Anlage mit der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit zu. Daher sind windige Standorte bei den Anlagenbetreibern begehrt. Es gibt sie vor allem an der Küste oder auf dem Meer. Die untere Grenze für den wirtschaftlichen Betrieb einer Windkraftanlage liegt bei mittleren Luftgeschwindigkeiten von fünf bis sechs Metern pro Sekunde, was einer mäßigen bis frischen Brise entspricht, wenngleich dabei stets noch weitere Faktoren zu berücksichtigen sind, etwa eine eventuelle Einspeisevergütung. Nach oben hin gibt es keine scharfe Grenze; moderne Anlagen können bei starkem Wind ihre Rotorblätter verdrehen – Experten sprechen vom Pitchen –, wodurch ihre Turbinen selbst bei Sturm in einem sicheren Betriebszustand bleiben. Überhaupt ist das Pitchen heute die wichtigste Methode, um die Drehzahl oder die Leistung der Maschinen zu regeln. Je nach Windstärke und elektrischer Last, die am Generator anliegt, werden die Rotorblätter dazu mehr oder weniger stark in den Wind hinein- oder aus ihm herausgedreht.

Nach Angaben des norddeutschen Windturbinenherstellers Enercon produziert eine 2,3-Megawatt-Anlage des Typs E-82 während ihrer gesamten Lebensdauer, die auf 20 Jahre angesetzt ist, je nach Standort zwischen 100 und 150 Gigawattstunden. Das heißt, sie stellt mindestens 35-mal so viel Energie bereit, wie für ihre Produktion, ihre Errichtung, ihren Betrieb und ihre Demontage benötigt wird. Nach spätestens sieben Monaten hat die Anlage ihre »energetischen Kosten« also wieder eingespielt. Steht eine E-28 an der Küste, spielt sie sogar das 51-Fache ihrer energetischen Kosten wieder ein,

Windparkoptimierung: Gemeinsam schwächer

Oft ist das Ganze mehr als die Summe seiner Einzelteile. Für Windparks gilt das nicht: Deren Leistung erreicht selten den kumulierten Wert der einzelnen Anlagen. Der Grund hierfür sind Turbulenzen, die jede Anlage erzeugt, wenn ihre Rotoren die Luft wie ein Quirl durcheinanderwirbeln. Weiter hinten liegende Windräder befinden sich dann erstens im Windschatten und laufen zweitens in der unruhigen Luft nicht mehr rund. Dadurch schwankt ihre Stromerzeugung, und Vibrationen setzen ihnen mechanisch zu, was die Betriebsdauer schmälert.

Stefan Emeis vom Karlsruher Institut für Technologie hat mit Modellrechnungen ermittelt, wie weit Windkraftanlagen voneinander entfernt sein sollten. Zwar ging Emeis in erster Näherung von unendlich breiten Windparks aus, ignorierte also die Effekte von den Rändern. Trotzdem stimmen seine Ergebnisse mit gemessenen Werten gut überein. Demnach sollte der minimale Abstand zwischen zwei Offshore-Windrädern sechs bis zehn Rotordurchmesser betragen. Zurzeit gilt als Faustformel für Anlagen nahe der Küste ein Mindestabstand vom Fünffachen des Rotordurchmessers in Hauptwindrichtung, sonst vom Dreifachen. Auch der Abstand ganzer Windparks voneinander spielt eine Rolle: Nach Emeis' Berechnungen ist deren Wirkung noch in 20 Kilometer Entfernung messbar.

Die Modelle des Karlsruher Forschers zeigen ferner, welch große Rolle die Rauigkeit des Untergrunds spielt. Je glatter er ist, desto länger dauert es, bis sich das Strömungsprofil der verwirbelten Luft wieder normalisiert. Deshalb müssen Anlagen auf See generell weiter voneinander entfernt sein als solche an Land, wo Bäume oder Hügel für natürliche Unebenheiten sorgen. »Würde man Offshore-Turbinen in gleicher Dichte installieren wie landgestützte Anlagen, dann würden sie kaum mehr Ertrag liefern als an Land«, betont Emeis.

Künftig sollen elektronische Steuersysteme die Ausbeute von Windparks steigern. Aus Messungen der Wind- und Rotorgeschwindigkeiten, der Temperatur und der Turbinenleistungen errechnet etwa ein von Siemens entwickeltes Computermodell das Verhalten einzelner Turbinen sowie die Einstellungen für einen möglichst turbulenzarmen Betrieb. Obwohl das System die Leistung einzelner Windräder oft drosseln muss, erhöht sich insgesamt der Ertrag des Ensembles. Die Betreiber können mit dem Programm entweder den Energieertrag oder die Betriebsdauer optimieren – oder beide Parameter ausbalancieren. Seit etwa zwei Jahren durchläuft die Software einen Dauertest im schwedischen Windpark Lillgrund.

Einen anderen Ansatz verfolgt Robert W. Whittlesey vom California Institute of Technology (Pasadena, Kalifornien). Er plant, Windparks nach dem Vorbild von Fischschwärmen aufzustellen. Dort schwimmen die Tiere so, dass die von ihnen erzeugten Strömungen ihre hinteren Artgenossen mitziehen. Whittlesey ordnet die Windräder deswegen in relativ engem Abstand an und lässt sie paarweise gegenläufig rotieren. Die Duos fächeln sich so gegenseitig Luft zu. Das funktioniert allerdings nicht mit den üblichen, propellerähnlichen Rotoren; stattdessen nutzt der amerikanische Forscher so genannte Darrieus-Rotoren mit vertikalen Achsen (siehe Kasten S. 82/83). Für sich genommen sind diese zwar weniger effizient, sie kommen aber besser mit turbulenten Winden zurecht.

Whittlesey und sein Team erzielten Windparkleistungen von 20 bis 30 Watt pro Quadratmeter Fläche, was etwa der zehnfachen Ausbeute herkömmlicher Windfarmen entsprechen soll. Zudem lieferten bei Testläufen selbst die Turbinen in der fünften Reihe noch Leistungen von 95 Prozent, während normale Windräder da oft schon abgeschaltet werden müssen. Rotoren mit vertikalen Drehachsen müssen allerdings enormen Fliehkräften und Vibrationen standhalten, was ihren Alltagseinsatz bislang einschränkt.

mit einer Amortisationszeit von weniger als fünf Monaten. Die Kohlendioxidfreisetzung der Anlage beträgt, Enercon zufolge, umgerechnet sechs bis neun Gramm pro Kilowattstunde. Bei Offshore-Windrädern beläuft sich dieser Wert auf etwa 30 Gramm, was aber immer noch 20-mal weniger ist als der durchschnittliche Wert des derzeitigen deutschen Strommixes. Die Investitionskosten von zirka 800 Euro pro Kilowatt installierter Leistung liegen für Windenergieanlagen ähnlich hoch wie für Kohlekraftwerke.

Auf der Suche nach Speichertechnologien

Ein generelles Problem der erneuerbaren Energien ist deren Unstetigkeit. Wettervorhersagen erlauben es zwar, die Leistung, die Windparks ins Stromnetz einspeisen, innerhalb von Stunden oder gar Tagen mit einer Genauigkeit von teils mehr als 90 Prozent vorauszuberechnen. Doch das ändert nichts daran, dass es immer mal wieder Flauten gibt, bei denen nur sehr wenig Strom aus Windenergie zur Verfügung steht, oder stürmische Tage, an denen die Turbinen überdurchschnittlich viel Strom ins Netz speisen. Dieser Wechsel bringt eine außergewöhnliche Belastung für die Stromnetze und die übrigen Kraftwerke mit sich, denn Angebot und Nachfrage müssen bei Strom stets ausbalanciert sein. Sonst könnten Spannung und Frequenz des Netzstroms zu hohe Werte annehmen und angeschlossene Elektrogeräte beschädigen.

Wissenschaftler und Ingenieure suchen deshalb händeringend nach neuen Möglichkeiten, überschüssigen Strom zu speichern. Die Pumpspeicherkraftwerke, die diese Aufgabe normalerweise in Deutschland und Europa übernehmen, haben eine viel zu geringe Kapazität, um die künftigen Leistungsspitzen nach dem Ausbau der Windenergie aufzufangen. Und beliebig erweitern lassen sie sich nicht. Um dieses Problem zu lösen, gibt es unter anderem den Vorschlag, überschüssigen Strom aus Windkraftanlagen zur Elektrolyse von Wasser zu nutzen. Dabei entstünden Wasser- und Sauerstoff. Den Sauerstoff könnte man in die Luft blasen, den Wasserstoff dagegen ins vorhandene Gasnetz einspeisen, um daraus später wieder Strom zu gewinnen, Heizungen zu befeuern oder Fahrzeuge anzutreiben. Laut dem Deutschen Verein des Gas- und Wasserfaches beträgt die maximal zulässige Wasserstoffkonzentration im deutschen Erdgasnetz derzeit etwa fünf Volumenprozent. Das entspricht rund 4,3 Milliarden Kubikmetern oder einer gespeicherten Energie von 15 Terawattstunden – ein Drittel der jährlichen Stromproduktion aller deutschen Windkraftanlagen.

Würde der Wasserstoff mit Hilfe des Treibhausgases Kohlendioxid zu Methan verarbeitet, ließe sich sogar die gesamte Kapazität des Erdgasnetzes nutzen, die derzeit etwa 230 Terawattstunden beträgt und 2500-fach über der Kapazität der deutschen Pumpspeicherkraftwerke liegt. Nach Berechnungen von Greenpeace würden 230 Terawattstunden ausreichen, um Deutschland für zwei bis drei Monate mit Strom zu versorgen. Der Wirkungsgrad beim Umwandeln von Strom zu Erdgas beträgt laut Berechnungen des Zentrums für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW) Baden-Württemberg mehr als 60 Prozent. »Das ist auf jeden Fall besser, als die überschüssige Windenergie gar nicht zu nutzen«, sagt Michael Specht vom ZSW, der über entsprechenden Projekten forscht und bei Stuttgart eine Demonstrationsanlage betreibt.

Gregor Czisch hingegen, Physiker und Fachmann für Energiesysteme, favorisiert eine andere Lösung (siehe Interview S. 86). Er spricht sich für ein kontinentübergreifendes Stromverbundnetz aus, das sich wie bei der Desertec-Initiative von Skandinavien bis zum Tschad erstreckt. In solch einem »Supergrid« würden sich das Angebot und die Nachfrage von Windenergie außerordentlich gut ausbalancieren lassen, haben umfangreiche Berechnungen von Czisch ergeben. In seinen Optimierungsmodellen haben noch nicht einmal die Windräder die Nase vorn: So genannte Fallwindkraftwerke würden sich theoretisch sogar noch besser ins Verbundnetz einpassen. »Wenn ich in der Lage bin, Strom sehr günstig aus ganz unterschiedlichen Quellen und damit sicher zu bekommen, muss ich die Technik doch entwickeln«, argumentiert der Physiker. Er weist darauf hin, dass der Aufbau eines europäisch-afrikanischen Supergrids, mitsamt der dafür notwendigen Kraftwerksparks und Leitungen, zugleich die wirtschaftliche Entwicklung des afrikanischen Kontinents vorantreiben könnte.

MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de

Unser Online-Dossier »Energie«
finden Sie unter

www.**spektrum.de**/energie

DER AUTOR

Gerhard Samulat ist Diplomphysiker und arbeitet als freier Wissenschaftsjournalist in Wiesbaden.

QUELLE

Czisch, G.: Szenarien zur zukünftigen Stromversorgung, kostenoptimierte Variationen zur Versorgung Europas und seiner Nachbarn mit Strom aus erneuerbaren Energien. Dissertation 2006, http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:hebis:34-2006041195 96

WEBLINKS

www.erneuerbare-energien.de
Website des BMU mit vielen weiterführenden Links
www.dewi.de
Deutsches Windenergie-Institut

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1130113**

INTERVIEW

Windstrom aus Nordafrika

Der Physiker **Gregor Czisch** hat in umfangreichen Berechnungen untersucht, welche Möglichkeiten ein interkontinentales Stromverbundnetz bietet, das sich von Europa bis nach Afrika erstreckt. Im Gespräch mit »Spektrum der Wissenschaft« prangert er Fehlentwicklungen beim Projekt Desertec an und erläutert die Potenziale der Windenergie für Europa und seine Nachbarn.

Spektrum: Herr Czisch, Sie gelten als einer der Vordenker des Desertec-Projekts. Wie zufrieden sind Sie mit seinem Verlauf?

Czisch: Meine Analysen zeigen, dass es sinnvoll ist, großräumig zu kooperieren, was die Desertec-Initiative auch vorsieht. Allerdings konzentriert sich das Projekt zurzeit auf die Solarenergie. Meine Berechnungen haben ergeben, dass nicht sie die kostengünstigste Lösung ist, sondern die Windenergie. Das gilt auch für Nordafrika, obwohl man die Wüsten dort zunächst intuitiv mit der Sonne verbindet. Die afrikanischen Sommerwinde mit ihren riesigen Potenzialen ergänzen sich hervorragend mit den europäischen Winterwinden. Wenn es gelänge, die beiden Regionen zu verknüpfen, führte das zu einer sehr ausgeglichenen Stromerzeugung. Windenergie kann zum Leistungsträger der künftigen Stromversorgung werden.

Offenbar haben das die Verantwortlichen anders gesehen.

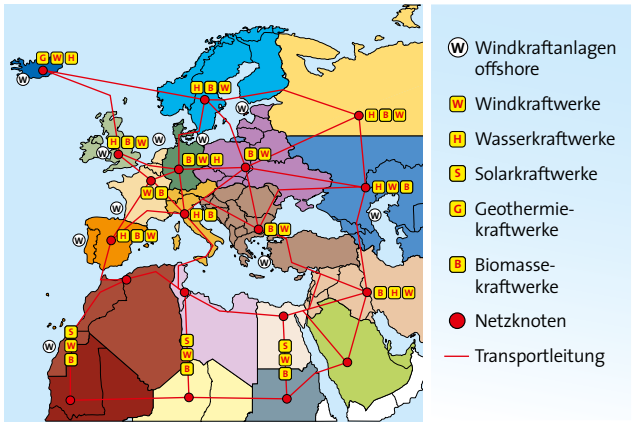
Czisch: Ich hatte versucht, diesen Aspekt deutlich zu machen, stieß damit aber offensichtlich auf taube Ohren. Irritierend ist ebenso, dass man sich beim Umbau der Energieversorgung so viel Zeit lässt: 2050 sollen 15 Prozent der europäischen Stromerzeugung aus Afrika kommen. Das halte ich für viel zu wenig. Das Problem liegt darin, dass die Solarthermie – zurzeit die bevorzugte Technologie bei Desertec – nur um einige hundert Megawatt pro Jahr ausgebaut wird. Schneller ginge es mit der Windenergie, die heute bereits um 40 Gigawatt pro Jahr wächst. Es steht zu befürchten, dass wir mit der Entscheidung, bei Desertec auf Solarenergie zu setzen, noch sehr lange Kohle- oder Gaskraftwerke betreiben müssen oder gar gezwungen sind, neue zu bauen.

So oder so, ein Umbau ist nicht billig.

Czisch: Die Kosten hängen stark davon ab, wie lange der Umbau dauert. Ich halte einen kurzen Zeitraum für sinnvoll; sagen wir 20 Jahre. Nach meinen Berechnungen betrügen die jährlichen Investitionen dann etwa 0,6 Prozent des Bruttosozialprodukts der gesamten Versorgungsregion. Heute gibt Deutschland jährlich mehr als drei Prozent des Bruttosozialprodukts für die Stromwirtschaft aus. Und die Bruttoanlageninvestitionen – in Fabriken, technische Anlagen und so weiter – liegen in den Industrieländern bei 15 bis 25 Prozent des Bruttosozialprodukts pro Jahr. Für Europa wäre so ein Umbau daher eher ein Klacks.

Wie teuer wäre der Strom anschließend?

Czisch: Billiger als heute. Selbst wenn ich aktuelle Preise ansetze, komme ich für die Vollversorgung Europas mit Strom aus erneuerbaren Energien auf weniger als fünf Cent pro Kilowattstunde. Das liegt deutlich unterhalb dessen, was man heute an der Strombörse für billigen Grundlaststrom zahlt. Hinzu kommt, dass wir mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien auch Geld für neue fossil befeuerte Kraftwerke – Betriebskosten und Investitionen – sparen würden. Wenn wir jedoch langsamer umsteigen, wie derzeit bei Desertec vorgesehen, gleitet uns das Klimaproblem



Schema eines Stromverbundnetzes, basierend auf Optimierungsmodellen von Gregor Czisch

BEWAG

Der Physiker und promovierte Elektroingenieur Gregor Czisch ist Experte für künftige Energieversorgungssysteme. Er arbeitete für den Wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU). Verschiedene Ministerien, Parlamente, Unternehmen und andere Einrichtungen zogen ihn als Berater heran.

völlig aus den Händen, weil wir noch sehr lange fossile Stoffe verbrennen müssten. Das kann doch niemand wollen.

Ist die Umstellung auf erneuerbare Energieträger überhaupt machbar, solange Speichertechnologien fehlen, um deren schwankende Stromerzeugung an den Bedarf anzupassen?

Czisch: In der Tat: Wenn man zu kleinräumig denkt, ist das Scheitern programmiert. In einem großräumigen Verbundnetz hingegen gibt es kaum überschüssigen Strom. Angebot und Nachfrage gleichen sich hervorragend aus. Der Rest kann mit bestehenden, ebenfalls großräumig verteilten Wasser- oder Biomassekraftwerken gepuffert werden. Dass wir heute oft Windkraftanlagen herunterregeln müssen, ist ausschließlich dem unzureichenden Stromnetz geschuldet. Mit den geplanten Offshore-Windparks in der Nord- und Ostsee wird sich das ohne hinreichenden Netzausbau noch verschärfen.

In Ihren Modellen kommen die Windräder auf See ja sowieso ziemlich schlecht weg.

Czisch: Meine Berechnungen ermitteln optimale Lösungen. Sie katapultieren gnadenlos alles raus, was zu teuer ist. Übrig bleibt die wirtschaftlich sinnvollste Lösung. Offshore-Windparks gehören nicht dazu. Sie tauchen in den Analysen erst wieder auf, wenn ich die Rahmenbedingung einführe, dass mindestens 50 Prozent des erneuerbaren Stroms von nationalen Standorten stammen sollen.

Ist der massive Ausbau der Windenergie in Deutschland dann überhaupt gerechtfertigt?

Czisch: In meinen Modellen ist unser Land eher eine Stromdrehscheibe. Wir haben in anderen europäischen Ländern und in Afrika viel bessere Standorte, um Strom zu produzieren. Sein Transport hierher wäre relativ billig.

Gibt es ähnliche Überlegungen auch für andere Erdteile?

Czisch: In den USA entsteht gerade eine entsprechende Forschergruppe, und ich führe Gespräche mit chinesischen Kollegen. Natürlich ist es einfacher, ein solches Konzept innerhalb einer großen Nation umzusetzen, etwa wenn es darum geht, die dafür notwendigen Stromnetze auszubauen oder die regulativen Rahmenbedingungen zu schaffen. Dennoch wäre in Europa jetzt die Zeit gekommen, dieses Netz aufzubauen. Leider liegen die Planungen weit hinter dem zurück, was wir eigentlich bräuchten. Sogar Afrika ist da weiter als wir. Weil es dort hervorragende Wasserkraftstandorte gibt, die so viel billigen Strom produzieren können, dass einzelne Länder ihn nicht auszuschöpfen vermögen, haben sich die meisten afrikanischen Staaten zu so genannten Power-Pools zusammengeschlossen. Aber die notwendigen Investitionen, um Kraftwerke und Leitungen zu errichten, übersteigen oft die Finanzkraft der afrikanischen Nationen. Da bietet sich die Zusammenarbeit mit Europa an.

Sie glauben also, dass ein europäisch-afrikanisches Verbundnetz realisierbar ist?

Czisch: Das ist keine Frage des Glaubens, sondern wissenschaftlich erwiesen. Volkswirtschaftlich wäre die internationale Zusammenarbeit sinnvoll. Es sind derzeit eher nationale Befindlichkeiten – insbesondere auf europäischer Seite – und eine unausgewogene Klientelpolitik, die dazu führen, dass die wichtigen Schritte nicht stattfinden. Wenn wir aber in der Lage sind, uns sehr günstig mit Strom aus erneuerbaren Energien zu versorgen, müssen wir die dafür nötige Infrastruktur und das Regelwerk doch entwickeln. Technisch ist das alles kein Problem. Wegen der Größe des interkontinentalen Verbunds bräuchte auch niemand Versorgungsengpässe zu fürchten: Wenn die Windenergie nicht aus Marokko oder Ägypten kommt, dann eben aus Kasachstan oder der Nord- und Ostsee oder aus den dafür vorgesehenen Backup-Kraftwerken. ~

Die Fragen stellte **Gerhard Samulat**.

KYBERNETIK

Rätselhafte Koordination in Vogelschwärmen

In Schwärmen bewegen sich Vögel exakt aufeinander abgestimmt, als würden sie ferngesteuert oder auf geheimnisvolle Weise dirigiert. Wie kommt ein so hochgradig koordiniertes Verhalten von unabhängigen Individuen zu Stande?

Von Brian Hayes

Um die 1000 Stare erheben sich gleichzeitig von den Bäumen am Flussufer. Die aufsteigende Vogelwolke hat zunächst die Form einer Träne. Dann verwandelt sie sich in einen Schmetterling, um kurz darauf einen kreisenden Strudel zu bilden. Der verjüngt sich schließlich zu einem biegsamen, flatternden Band, das sich über den Abendhimmel zieht. Die Vorführung dauert zehn Minuten, dann schießt die Schar mit mächtigem Flügelrauschen knapp über meinen Kopf hinweg und lässt sich wieder auf der Baumreihe nieder – nur um wenig später für eine weitere Darbietung erneut aufzusteigen.

Solche anmutigen Formationsflüge von Staren oder anderen Vögeln lösen seit jeher Bewunderung und Erstaunen beim Betrachter aus. Sie zeigen die präzise Synchronisation eines Spielmannszugs, haben jedoch nichts von der starren Geometrie einer in Reih und Glied marschierenden Kolonne. Stattdessen sind die Bewegungen des Schwarms gleitend, flüssig, organisch – ganz so, als handle es sich um einen einzigen Organismus und nicht um eine Ansammlung zahlloser Individuen.

Wegen dieser erstaunlichen Koordination ziehen Vogelschwärme seit einiger Zeit auch das Interesse von Physikern, Mathematikern und Computerexperten auf sich. In den 1980er Jahren entstand ein erster theoretischer Rahmen, der es ermöglichte, das Verhalten großer, dichter Schwärme besser zu verstehen. Die Grundidee entstammte Computersimulationen. Sie besagte, dass lokale Interaktionen zwischen benachbarten Tieren – seien es nun Vögel, Insekten oder Fische – völlig ausreichen, einen Schwarm zusammenzuhalten und die Bewegungen der Individuen zu koordinieren. Möglicherweise gelte das sogar für größere Menschentrauben.

In neueren Untersuchungen haben Forscher diesen Ansatz weiterentwickelt. Insbesondere ist es durch die Verbindung von Stereofotografie mit digitaler Bildverarbeitung in einem ehrgeizigen Projekt gelungen, für jedes einzelne Tier in einem Schwarm Position und Geschwindigkeit zu ermitteln. Mit den so gewonnenen Daten ließen sich die früher verwendeten Algorithmen für die Bewegungen der Vögel erheblich verbessern. Zugleich erlebten die Forscher bei der Analyse der so erhaltenen dreidimensionalen Rekonstruktionen aber auch einige Überraschungen. Das betraf etwa die äußere Gestalt und die innere Struktur von Schwärmen. Vor allem hat sich herausgestellt, dass die Bewegungen der einzelnen Vögel noch weitaus stärker koordiniert sind, als die oberflächliche Betrachtung vermuten lässt.

Anfangs ging es bei der Erforschung von Vogelschwärmen vorrangig um die Frage, wie die für die kollektive Bewegung

AUF EINEN BLICK

SIMULATION VON KOLLEKTIVVERHALTEN

1 In Schwärmen verhalten sich Vögel wie ein einziger Organismus mit interner Steuerung. Es gibt jedoch keinen erkennbaren Anführer. Simulationen zeigen, dass allein die **Wechselwirkung zwischen benachbarten Vögeln** wesentliche Eigenschaften eines Schwarms erklären kann.

2 Nun gelang es Forschern durch eine Kombination von **Stereofotografie** und **digitaler Bildverarbeitung**, die Flugbahnen einzelner Tiere in Schwärmen zu verfolgen. Die Auswertung ergab überraschend, dass das Flugverhalten der Vögel noch stärker korreliert ist, als das Modell mit lokalen Interaktionen vorhersagt.

3 Demnach scheint sich der Schwarm in einem Zustand zu befinden, der dem **kritischen Punkt in Vielteilchensystemen** entspricht. Dabei herrschen Bedingungen, unter denen **großräumige Fluktuationen** auftreten können, die das gesamte System erfassen.

STARFLAG-PROJEKT, CNR

Zu Zigtausenden versammeln sich Stare am winterlichen Abendhimmel in Rom zu eindrucksvollen Flugvorführungen. Bei einem STARFLAG genannten Projekt dienten Stereofotografie und computergestützte Bildanalyse dazu, die dreidimensionalen Positionen und Geschwindigkeiten der Vögel in Schwärmen mit bis zu 4000 Tieren zu bestimmen. So konnten die Forscher neue Erkenntnisse über die Koordination und Synchronisation der Vogelbewegungen gewinnen.

nötigen Entscheidungen zu Stande kommen und auf welchen Wegen die dazu erforderliche Kommunikation abläuft. Wenn hunderte Vögel sich auf einmal erheben, wie stimmen sie dann ihre Starts untereinander ab? Und hat bei einem plötzlichen Schwenk des Schwarms ein Tier vorher die neue Richtung festgelegt?

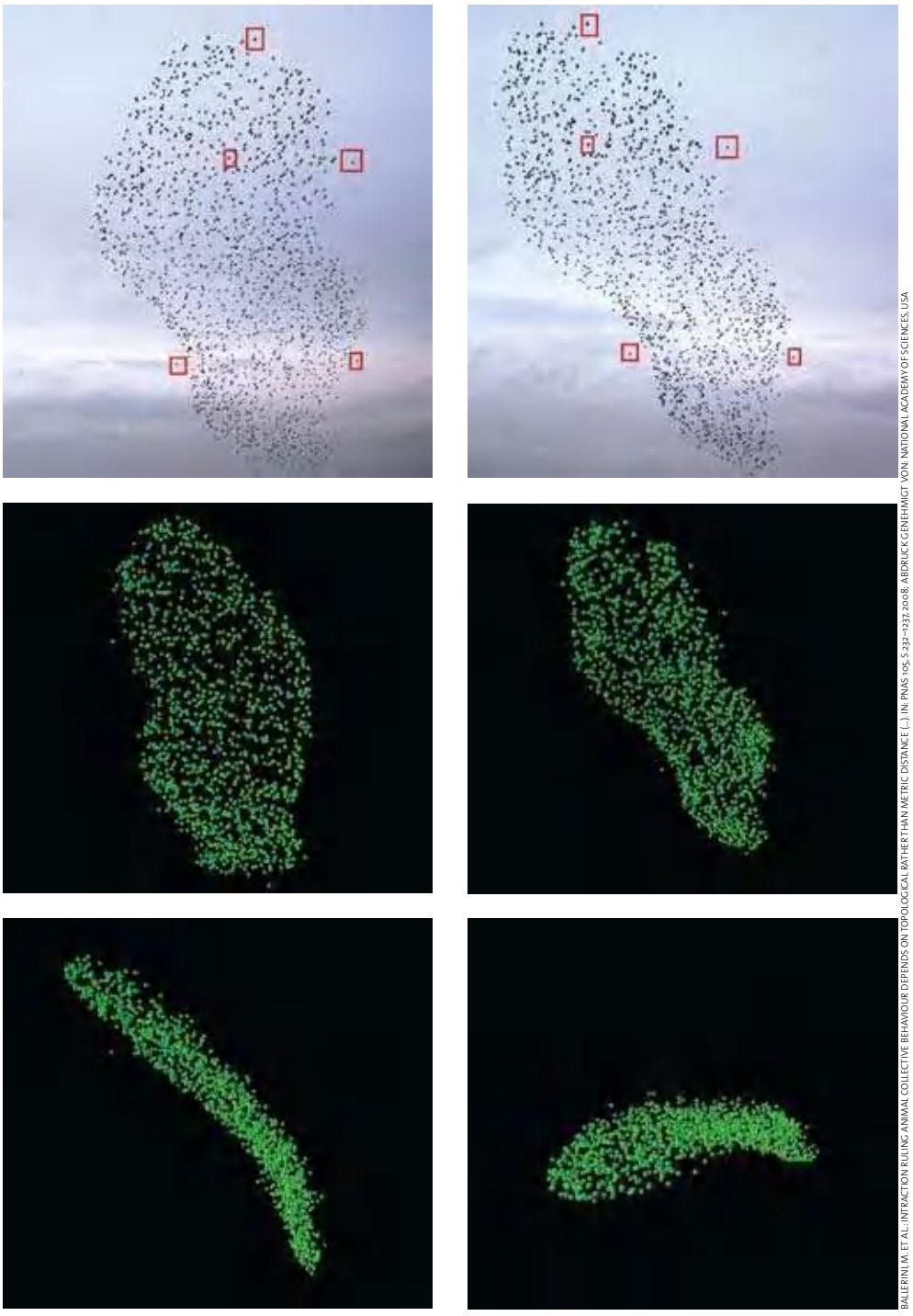
Menschen haben eine praktische Lösung für das Koordinationsproblem: Ein Anführer wird ernannt – etwa ein Dirigent oder Choreograf. Manchmal ergreift auch ein Diktator von sich aus die Macht. Verhält es sich bei Vögeln ähnlich? Der englische Dichter Alfred Tennyson (1809–1892) schrieb von »der wintererprobten Krähe«, die ihren Schwarm heimführt. Oder wechselt die Position des Leittiers vielleicht ständig? So könnte die Schar etwa stets dem Vogel folgen, der sich zufällig gerade an der Spitze der Formation befindet.

Allerdings haben Biologen bisher keinerlei Hinweis auf die Existenz eines Anführers in einem Schwarm entdeckt. Außerdem stellt sich die grundsätzliche Frage, wie Kommandos von ihm zu den anderen Vögeln gelangen. In großen, dicht gedrängten Pulks wären optische oder akustische Sig-

nale dafür viel zu unzuverlässig. Gegen die Existenz eines Leittiers spricht auch eine häufige Beobachtung: Stößt etwa ein Falke in den Schwarm, reagiert dieser ohne Verzögerung mit Ausweichmanövern; dass die bedrohten Vögel dafür erst auf die Instruktionen eines Anführers warten, erscheint wenig plausibel.

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts sah Edmund Selous (1857–1934) denn auch eher einen demokratischen Abstimmungsprozess am Werk. Der englische Hobbyornithologe, der über das Verhalten von Vogelschwärmen 30 Jahre lang akribisch Buch führte, verwarf die Idee eines festen Anführers als »schlichtweg undenkbar« und »einfach lächerlich«. Sein Alternativvorschlag vermag allerdings genauso wenig zu überzeugen. Selous fand die synchronisierten Bewegungen der Vögel so unheimlich, dass er glaubte, sie seien einzig und allein durch »Gedankenübertragung« oder »simultanes kollektives Denken« zu erklären. Mit anderen Worten: Vögel sollen telepathische Fähigkeiten haben.

Nicht nur die mysteriöse Kommunikationsform, sondern auch der gemeinsame Entscheidungsfindungsprozess



Um einen Schwarm dreidimensional aus Stereobildern rekonstruieren zu können, ist es notwendig, ein schwieriges Zuordnungsproblem zu lösen: Wie findet man heraus, welches Paar nichts sagender Kleckse auf den beiden Fotos denselben Vogel zeigt? In den zwei Aufnahmen ganz oben sind für fünf exponierte Tiere die jeweiligen Positionen rot umrahmt. Die STARFLAG-Gruppe hat automatisierte Verfahren für diese Zuordnung entwickelt. Aus den Unterschieden in der Position eines Vogels auf den Stereobildern lassen sich schließlich seine räumlichen Koordinaten errechnen. Das resultierende dreidimensionale Modell des Schwarms kann dann am Bildschirm gedreht und aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet werden. In den vier Grafiken erscheinen die Stare als grüne Punkte. Auf den beiden unteren Ansichten ist zu erkennen, was man auf den Fotos nicht sieht: dass der Schwarm eine abgeflachte Form hat.

BALLERINI, M. ET AL.: INTERACTION RULING ANIMAL COLLECTIVE BEHAVIOUR DEPENDS ON TOPOLOGICAL RATHER THAN METRIC DISTANCE (...). IN: PNAS 105, S. 232–1237, 2008. ABDRUCK GENEHMIGT VON: NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES, USA

scheint freilich kaum realistisch. Allein die Übermittlung der Absichten oder Wünsche von jedem Vogel zu allen anderen wäre schon äußerst aufwändig: Umfasst ein Schwarm n Tiere, dann müssten diese an die n^2 Nachrichten untereinander austauschen! Die Beweglichkeit des Schwarms hinge somit stark von seiner Größe ab; bei sehr vielen Vögeln käme die kollektive Entscheidung nur mit großer Verzögerung zu Stande.

Aus heutiger Sicht herrscht im Vogelschwarm weder Demokratie noch Diktatur. Es war nicht etwa ein Vogelkundler, sondern ein Experte für Computergrafik und Animation, der beide Vorstellungen in den 1980er Jahren mit einem Streich vom Tisch fegte. Craig W. Reynolds, der heute bei Sony Computer Entertainment arbeitet, schrieb damals ein Programm, in dem simulierte Vögel – die er »Boids« nannte – eine überzeugende Imitation von Schwarmverhalten zeigen. Sie benötigen dafür weder einen Anführer noch Gedankenübertragung. Jeder Boid achtet nur auf seine unmittelbaren Nachbarn und gehorcht drei einfachen Regeln:

Aus heutiger Sicht herrscht im Vogelschwarm weder Demokratie noch Diktatur

1. Versuche, nicht mit deinen Nachbarn zusammenzustoßen (Kollisionsvermeidung).
2. Versuche, mit derselben Geschwindigkeit und in derselben Richtung zu fliegen wie deine Nachbarn (Tempoangleichung).
3. Versuche, in der Nähe deiner Nachbarn zu bleiben (Kohäsion).

Diese Regeln sind in der angegebenen Reihenfolge hierarchisch geordnet. Kollisionsvermeidung hat also oberste Priorität. Erst wenn kein Zusammenstoß droht, passt ein Boid sein Tempo und seine Flugrichtung der mittleren Geschwindigkeit seiner Nachbarn an. Und nur wenn diese Parameter bereits annähernd übereinstimmen, bemüht er sich um einen geringeren Abstand – was in einem gewissen Konflikt mit den beiden anderen Vorschriften steht.

Als ich erstmals von dem Programm erfuhr, mochte ich kaum glauben, dass es funktioniert. Ein stabiler Zustand, in dem alle Boids annähernd parallelen Bahnen folgen, kam mir sehr unwahrscheinlich vor. Viel eher sollte die simulierte Vogelschar, wie mir schien, in viele kleine Schwärme zerfallen. Wirklich überzeugt war ich erst, als ich das Programm selbst ausprobieren und die Boids in Aktion erleben konnte. Die Modellschwärme ahmen ihre biologischen Vorbilder wirklich täuschend echt nach, auch wenn es kleinere Unterschiede gibt. Außerdem sind sie nicht nur stabil, sondern sogar ausgesprochen robust: Beginnt man die Simulation mit einer Schar sich rein zufällig bewegender Boids, finden sie sich spontan zu einem Schwarm zusammen. Wenn dieser von einem Hindernis aufgespalten wird, vereinigen sich die Teile anschließend wieder.

Was aber ist für die geradezu ballettartig wirkende Koordination eines solchen Schwarms verantwortlich? Obwohl jeder einzelne Boid sich allein an seinen unmittelbaren Nachbarn orientiert, interagieren diese ihrerseits mit ihren Nachbarn und so weiter. Offenbar steuert ein solches Netzwerk aus direkten und indirekten Wechselwirkungen die Kollektivbewegungen innerhalb des Schwarms. Dass dieses Geflecht aus schwachen Verbindungen kurzer Reichweite dafür ausreicht, ist die eigentliche Überraschung. Beginnt ein Boid an der Spitze des Schwarms seine Richtung zu ändern, dann erfährt das sein Kollege am hinteren Ende ja erst über zahlreiche Vermittler hinweg. Auch wenn zwischen den beiden Boids etliche solche Vermittlungsketten bestehen, erscheint es ziemlich verblüffend, dass ein Ereignis über derart weite Entfernungen noch einen so großen Einfluss ausüben kann. Fast möchte man wirklich an Gedankenübertragung glauben.

Das Boid-Modell von Reynolds war Teil eines grundlegenden Sinneswandels darüber, wie Tiere kollektiv handeln. Eine Wirkung verläuft demnach aufwärts (»bottom-up«) – vom Einzeltier zum Schwarm – statt in umgekehrter Richtung (»top-down«), sie ist zunächst einmal nur lokal statt global, und ihre Berechnung beruht auf Algorithmen statt Gleichungen. Das Modell geht nicht von einer bestimmten äußeren Gestalt des Schwarms aus und berechnet dann, wie sich die Vögel organisieren müssen, um sie zu erreichen. Vielmehr gibt es lediglich vor, auf welche Weise die einzelnen Vögel interagieren. Die Form, die der Schwarm daraufhin annimmt, ist eine so genannte emergente Eigenschaft, also ein neuer Zustand des Gesamtsystems, der aus der Vielzahl lokaler Wechselwirkungen erwächst, ohne deterministisch von ihnen vorgegeben zu sein.

Modelle nicht nur für Vögel

Reynolds war nicht der Einzige, der den Charme dieser Art von Modellen entdeckte. Frank Heppner von der University of Rhode Island in Kingston hatte seit den 1960er Jahren das Verhalten von Vögeln studiert und dabei unter anderem nach Anführern in Schwärmen gesucht. In den späten 1980er Jahren begann er unabhängig von Reynolds Modelle ohne Leittier zu formulieren, die auf der Idee eines zwischen den Individuen wirkenden »Kraftgesetzes« basierten – mit einer abstoßenden Wirkung von kurzer Reichweite und einer anziehenden über größere Distanzen.

Einige Jahre später veröffentlichte Tamás Vicsek von der Eötvös-Loránd-Universität in Budapest mit verschiedenen Kollegen ein weiteres Modell. Als möglichst einfaches und allgemein anwendbares Werkzeug zur Simulation von interessantem Kollektivverhalten verzichtet es völlig auf ornithologische Feinheiten. Es enthält im Wesentlichen nur die zweite von Reynolds' Regeln – die Tempoanpassung – in Kombination mit »weißem Rauschen«, also zufälligen Stö-

rungen. Mit dem Vicsek-Modell wurde schon das Kollektivverhalten der verschiedensten Organismen beschrieben, von Vögeln über Fische bis hin zu Bakterien.

Bald darauf entstanden spezielle Programmiersprachen und Softwaresysteme, die es erleichtern – und mit denen es mehr Spaß macht –, solche »agentenbasierten Modelle« zu erkunden. Mitchel Resnick vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge entwickelte Ende der 1990er Jahre eine erste solche Sprache: StarLogo. Weitere sind seitdem hinzugekommen, und die Begeisterung für agentenbasiertes Modellieren hat inzwischen von der Biologie auf die Sozialwissenschaften, das Finanzwesen und andere Bereiche übergegriffen. Allgemein werden Rechenverfahren, die ursprünglich dazu dienten, das Verhalten von Tiergruppen besser zu verstehen, heute als biologisch inspirierte Algorithmen – mit Namen wie »Schwarmintelligenz« oder »Ameisenkolonieoptimierung« – zur Lösung schwieriger Berechnungsprobleme eingesetzt.

Fotoshooting der besonderen Art

Die besten Computersimulationen von Vogelschwärmen sehen heute unglaublich realistisch aus – Reynolds erhielt für einige seiner Schwarmanimationen in verschiedenen Filmen 1998 sogar einen Oscar. Aber lehren sie uns auch etwas über wirkliche Vögel? Bis vor Kurzem war es sehr schwierig, diese Frage zu beantworten, weil zu wenig über die Flugbahnen der Einzeltiere in einem großen Schwarm bekannt war. Einen Vogel in der großen Masse der anderen auf Filmen oder Videos dreidimensional zu verfolgen, war praktisch unmöglich.

Mit den jüngsten Fortschritten beim Erfassen und Verarbeiten gewaltiger Datenmengen hat sich das jedoch grundlegend geändert. Am weitesten gekommen ist das interdisziplinäre STARFLAG-Projekt, in dem Forscher aus Italien, Frankreich, Ungarn und den Niederlanden zusammenarbeiten. Eine der beteiligten Gruppen, geleitet von Andrea Cavagna und Giorgio Parisi an der römischen Universität La Sapienza, hat es geschafft, in Starenschwärmen mit bis zu 4000 Tieren – sie bilden sich jeden Winter nur wenige Blocks von der Universität entfernt an Roms Hauptbahnhof – die Bewegung jedes einzelnen Vogels zu verfolgen. Cavagna und seine Kollegen bauten dazu auf dem Dach des nahe gelegenen Palazzo Massimo ihre Digitalkameras auf.

Weil Videorekorder nicht über die nötige Auflösung verfügen, arbeitete die Gruppe in Rom mit Fotoapparaten und schoss mit hoher Frequenz Bildserien. Dabei lieferten in 25 Meter Abstand aufgestellte Kamerapaare jene Tiefeninformation, aus der sich wie beim beidäugigen Sehen Entfernungen rekonstruieren lassen. Jede Kamera nahm fünf Bilder pro Sekunde auf, was allerdings nicht ganz ausreicht, um die Bewegung eines Stars wirklich verfolgen zu können. Deshalb lösten die Forscher zwei Kamerapaare im Wechsel aus, wodurch sich eine effektive Bildrate von zehn Aufnahmen pro Sekunde ergab. Zwei weitere Fotoapparate unterstützten die 3-D-Rekonstruktion.

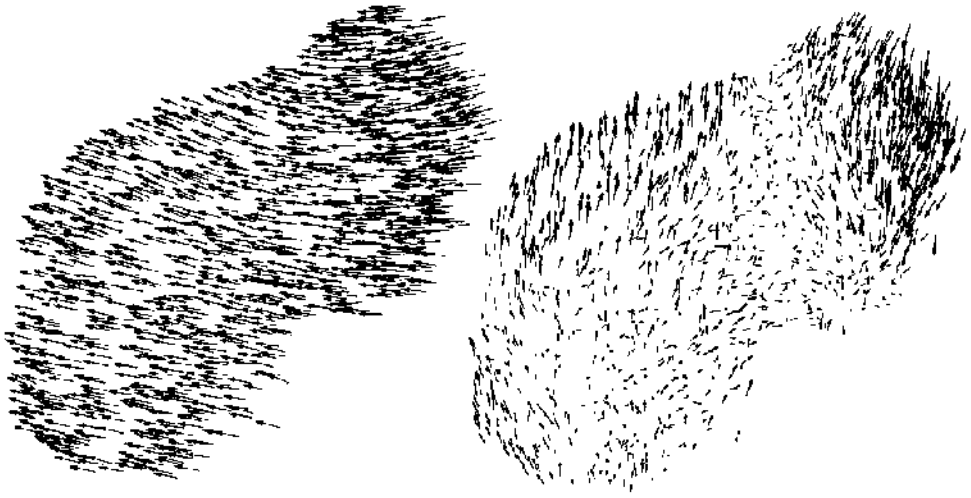
Die Bilder aufzunehmen war aber nur der erste Schritt; ihre Auswertung bildete die eigentliche Herausforderung. Selbst auf einem Foto mit hoher Auflösung ist ein 100 Meter von der Kamera entfernter Star kaum mehr als ein dunkler Farbfleck ohne besondere Merkmale. Wie also findet man in den Stereobildpaaren die Kleckse, die jeweils zum selben Vogel gehören? Und wie gelingt es, die Position dieses Vogels in einer ganzen Serie aufeinander folgender Fotos zu ermitteln? Erschwerend kommt hinzu, dass sich die Kleckse oft überlappen.

Für die Lösung dieser Probleme entwickelte das italienische Team ein ganzes Sortiment von Werkzeugen zur Bildanalyse. Im ersten Schritt eliminierten die Forscher Hintergrundeffekte wie Wolken und isolierten dadurch die Vogelkleckse. Anschließend trennten sie mit einem speziellen Verfahren einander überlappende Farbflecke. Auf diese Weise wandelten sie das Foto in eine Matrix um, die aus den Koordinaten von Punkten in der zweidimensionalen Bildebene bestand.

Der Sprung in die dritte Dimension verlangt, diese Punkte in den Aufnahmen mehrerer Kameras miteinander zu verknüpfen. Das grundlegende geometrische Prinzip ist gut bekannt: Ein Objekt, das aus zwei unterschiedlichen Blickwinkeln fotografiert wird, erscheint in den beiden Bildern an verschiedenen Stellen. Diese so genannte stereoskopische Disparität enthält die nötige Information, um die Abstände des Objekts von den Kameras und damit seine Position im dreidimensionalen Raum zu bestimmen. Was die Sache in diesem Fall so schwierig macht, ist der Umstand, dass auf den Bildern jeweils mehrere tausend Objekte erscheinen, die kaum unterscheidbar sind. Bevor also die Abstände berechnet werden können, muss man zunächst entscheiden, welcher Klecks in Bild A zu welchem in Bild B gehört, welche Kleckspaare also denselben Vogel zeigen.

> Mit Stereokameras und Bildanalyse ist es gelungen, in Starenschwärmen mit bis zu 4000 Tieren die Bewegung jedes einzelnen Vogels zu verfolgen

Die STARFLAG-Gruppe entwickelte ein schrittweises Verfahren zur Lösung dieses Zuordnungsproblems. Als Erstes sucht ein Algorithmus zur Mustererkennung nach »Konstellationen« in Bild A, deren Anordnung so markant ist, dass sich die zugehörigen Punkte auch in Bild B identifizieren lassen – selbst wenn die Konstellation durch den geänderten Blickwinkel leicht verzerrt erscheint. Etwa 50 solcher korrespondierenden Paare genügen zur näherungsweisen Bestimmung der geometrischen Transformation, die jedem Punkt in A seine entsprechende Pixelposition in B zuordnet. Aufnahmen der dritten, in der Nähe von A aufgestellten Kamera C helfen, diese erste Näherung weiter zu verbessern. Wegen des geringen Abstands von A und C und der dadurch reduzierten Disparität ist das Zuordnungsproblem für die ent-



CAVAGNA, A. ET AL.: SCALE-FREE CORRELATIONS IN STARLING FLOCKS. IN: PNAS 107, S. 11865–11870, 2010; ABDRUCK GENEHMIGT VON: NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES, USA

Die Analyse der Geschwindigkeiten aller Vögel lässt ein Korrelationsmuster erkennen, das sich über den gesamten Schwarm erstreckt. Links sind die Geschwindigkeitsvektoren der einzelnen Vögel zu sehen. Rechts wurde jeweils die mittlere Geschwindigkeit des gesamten Schwarms subtrahiert; gezeigt sind also nur die Fluktuationen um diesen Mittelwert – zur Verdeutlichung mit stark vergrößerten Vektoren. Letztlich müssen sich alle Fluktuationen gegenseitig aufheben, weil die Gesamtbewegung des Schwarms herausgerechnet wurde. Deshalb weisen die Vektoren in unterschiedliche Richtungen. Dennoch gibt es Regionen, die sich über weite Bereiche des Schwarms erstrecken, in denen die Pfeile annähernd parallel verlaufen. Das zeigt, dass die Geschwindigkeiten praktisch über den gesamten Schwarm hinweg korreliert sind – ein frappierender Befund, der sich nicht leicht erklären lässt.

sprechenden Bildpaare nämlich leichter. Ist diese Zuordnung aber einmal gelungen, kann sie als Anhaltspunkt für die Suche nach weiteren A-B-Paaren dienen. Mit einem solchen Algorithmus gelang es den italienischen Forschern, im Mittel für etwa 88 Prozent aller Vögel in den untersuchten Bildern ihre Position im dreidimensionalen Raum zu bestimmen.

Um einen Vogel im Flug zu verfolgen und dabei sowohl seine Position als auch seine Geschwindigkeit berechnen zu können, muss man diese Zuordnung aber nicht nur für zwei, sondern für viele aufeinander folgende Bilder eines Kamerapaars hinweg treffen. Theoretisch ist das eine unlösbare Aufgabe. Die präzise Koordination innerhalb eines Starenschwarms vereinfacht sie jedoch: Weil zu jedem Zeitpunkt fast alle Vögel mit ähnlicher Geschwindigkeit annähernd in dieselbe Richtung fliegen, ist der Vektor der mittleren Geschwindigkeit ein guter Indikator dafür, wo ein Tier im nächsten Bild ungefähr zu finden sein wird.

Optische Verzerrung

Die Erkenntnisse der STARFLAG-Gruppe bestätigten das gängige theoretische Modell, wonach Schwärme durch lokale Interaktionen koordiniert und zusammengehalten werden. Es gab allerdings auch Überraschungen. Zum Beispiel stellte sich heraus, dass die äußere Gestalt von Vogelschwärmen nicht die ist, die sie zu sein scheint. Dem beiläufigen Betrachter kommen die Pulks meist rundlich vor – mit einer Form, die trotz gewisser Verzerrungen grob an eine Kugel oder einen Zylinder erinnert. Die dreidimensionalen Rekonstruktionen zeigen dagegen, dass ein typischer Schwarm in Wirklichkeit nahezu zweidimensional ist: Er erstreckt sich vor allem in der Horizontalen, in der Vertikalen ist er dagegen deutlich abgeplattet. Das mittlere Verhältnis von Länge zu Breite zu Dicke beträgt 6 : 3 : 1. Es handelt sich also um eine Art Pfannkuchen.

Cavagna und seine Kollegen vermuten einen physikalischen beziehungsweise physiologischen Grund für diese Flugformation: Vertikale Bewegungen kosten mehr Energie als seitliche; deshalb dürften Vögel lieber auf gleich bleibender Höhe fliegen. Warum Beobachter einen ganz anderen Eindruck haben, liegt wohl an ihrem Blickwinkel. Wer steil nach oben schaut, kann die vertikale Ausdehnung des Schwarms nur schlecht erkennen und ist geneigt, sie für ebenso groß zu halten wie die horizontale.

Ein weiteres unerwartetes Ergebnis der STARFLAG-Untersuchungen war, dass die Vogeldichte in Starenschwärmen außen am größten ist und nach innen hin beständig abnimmt – genau umgekehrt wie bei frei beweglichen Objekten, die durch eine Kraft großer Reichweite aneinander gebunden werden. In Kugelsternhaufen zum Beispiel verringert sich die Dichte vom Zentrum zum Rand hin. Die Forscher aus Rom spekulieren, dass ein solcher inverser Dichtegradient bei Angriffen von Greifvögeln nützlich sein könnte. Einen Entstehungsmechanismus bieten sie jedoch nicht an. Wie müssten die Boid-Regeln von Reynolds geändert werden, damit die beobachtete Verteilung auch im Modell auftritt? Darauf gibt es bisher keine Antwort.

In einem entscheidenden Punkt hat die Gruppe aus Rom das Reynolds-Modell bereits modifiziert. In der ursprünglichen Simulation ist die Umgebung eines Vogels geometrisch definiert: Er verfolgt die Bewegungen aller anderen innerhalb eines festen Radius um seine eigene Position. Cavagna und seine Kollegen sprechen sich für eine »topologische« Alternative aus. Jeder Vogel interagiert demnach mit einer festen Anzahl seiner nächsten Nachbarn – vermutlich sechs oder sieben –, unabhängig von deren Entfernung. Der Grund dafür ist die Beobachtung, dass Schwärme sich in ihrer Dichte stark unterscheiden können – um den Faktor zwei und mehr. Wären Interaktionen auf einen festen Radius beschränkt, hätte in einem dichteren Pulk jeder Vogel deutlich mehr nächste Nachbarn als in einem lockeren. Den Beobachtungen zufolge verhalten sich Schwärme aber über das gesamte Dichtespektrum hinweg gleich.

Skalenfreies Schwärmen

Das faszinierendste Resultat bisher erbrachte aber die Untersuchung der Geschwindigkeitskorrelationen. Dass die Flugbahnen der Vögel eng miteinander zusammenhängen, überrascht nicht; denn anderenfalls würde sich der Schwarm auflösen. Doch die neue Erkenntnis geht darüber hinaus. Subtrahiert man die mittlere Geschwindigkeit des Schwarms von der Individualgeschwindigkeit jedes einzelnen Vogels, erhält man das »Feld der residualen Fluktuationen«. Das sind die kleineren Vektoren, die anzeigen, wie stark die Bewegung eines einzelnen Vogels vom Mittelwert des gesamten Schwarms abweicht. Es stellt sich nun heraus, dass diese Relativbewegungen ebenfalls stark korreliert sind.

Eine wichtige statistische Kenngröße ist die Korrelationslänge. Sie gibt an, bis in welche Entfernung ein beobachteter Zusammenhang besteht. In unserem Fall entspricht sie also dem Abstand, jenseits dessen der Einfluss eines Vogels auf einen anderen so weit nachgelassen hat, dass die Bewegungen der beiden als voneinander unabhängig gelten können. Erstaunlicherweise nimmt diese Korrelationslänge in Starenschwärmen mit deren Größe zu, und zwar derart, dass selbst Vögel an entgegengesetzten Enden des Schwarms immer noch miteinander in Verbindung stehen. Forscher bezeichnen solche Korrelationen als skalenfrei.

Dass die Korrelationslänge die Reichweite der direkten Wechselwirkung übersteigt, ist an sich nicht ungewöhnlich; so etwas tritt in vielen Systemen auf. So haben in Ferromagneten die Wechselwirkungen zwischen den Atomen jeweils nur eine geringe Reichweite; trotzdem sorgen sie für eine gemeinsame Ausrichtung der Elektronenspins über viel größere Distanzen. Die Korrelationslänge nimmt aber nicht unbegrenzt mit der Größe des Festkörpers zu, sondern hat eine Obergrenze, weshalb sich ein makroskopischer Ferromagnet aus vielen voneinander unabhängigen Bereichen zusammensetzt. Die Korrelation ist also nicht skalenfrei.

Warum gibt es in Vogelschwärmen keine vergleichbare Schranke für die Korrelationslänge? Eine Möglichkeit wäre, dass sich ein Schwarm nahe an einem »kritischen Punkt« bewegt. Dann herrschen Bedingungen, bei denen Fluktuationen in allen möglichen Größenordnungen auftreten können. Für einen Ferromagneten liegen solche Bedingungen bei einer kritischen Temperatur vor, dem so genannten Curie-Punkt. Im Fall von Vogelschwärmen ist nicht klar, was diesem Punkt entsprechen oder welche physikalische Größe die Rolle der Temperatur übernehmen könnte. Die Cavagna-Gruppe erklärt dazu:

Skalenfreie Korrelationen implizieren, dass die Gruppe in einem strengen Sinn ... mehr als die Summe ihrer Teile ist. Der effektive Wahrnehmungsbereich jedes Individuums ist so groß wie die gesamte Gruppe; dadurch wird es möglich, dass alle Tiere ungeachtet ihrer Abstände unvermindert Informationen untereinander austauschen: Die Gruppe kann als Einheit agieren.

Diese Beschreibung erinnert stark an Selous' »kollektives Denken«. Natürlich geht es dabei nicht um Telepathie; die Vögel kommunizieren auf herkömmliche physikalische Weise. Doch das Resultat erscheint dadurch nicht weniger eindrucksvoll – und eher noch mysteriöser.

DER AUTOR

Brian Hayes ist Autor der Kolumne »Computing Science« im »American Scientist«. Er schreibt regelmäßig in seinem Blog bit-player.org.

QUELLEN

Ballerini, M. et al.: Interaction Ruling Animal Collective Behavior Depends on Topological rather than Metric Distance: Evidence from a Field Study. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA 105, S. 1232–1237, 2008

Cavagna, A. et al.: Scale-Free Correlations in Starling Flocks. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA 107, S. 11865–11870, 2010

Heppner, F., Grenander, U.: A Stochastic Nonlinear Model for Coordinated Bird Flocks. In: Krasner, S. (Hg.): The Ubiquity of Chaos. American Association for the Advancement of Science, Washington 1990, S. 233–238

Resnick, M.: Turtles, Termites and Traffic Jams: Explorations in Massively Parallel Microworlds. MIT Press, Cambridge 1994

Reynolds, C.W.: Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model. In: Computer Graphics 21, S. 25–34, 1987

Vicsek, T. et al.: Novel Type of Phase Transition in a System of Self-Driven Particles. In: Physical Review Letters 75, S. 1226–1229, 1995

WEBLINKS

http://hal.elte.hu/~vicsek/papers/RMP-tv-az-as-submitted.pdf
Englischsprachiger Artikel von T. Vicsek und A. Zafiris über Kollektivbewegungen

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1130114**

© American Scientist
www.americanscientist.org

UFZ-Spezial

HELMHOLTZ-ZENTRUM FÜR UMWELTFORSCHUNG – UFZ JUNI 2011

IN SACHEN WASSER

Ob Wassermangel, Hochwasser, Verunreinigungen, Übernutzung oder schlechtes Wassermanagement – sie stellen Politik, Wirtschaft und Wissenschaft vor große Herausforderungen. Das UFZ leistet mit seiner breiten Expertise in der interdisziplinären Wasserforschung einen wichtigen Beitrag für ein nachhaltiges Management von Wasserressourcen.

HELMHOLTZ
ZENTRUM FÜR
UMWELTFORSCHUNG
UFZ

INHALT

S. 2–3 Vorwort des Wissenschaftlichen Geschäftsführers des UFZ

S. 4–5 Was moderne Wasserforschung leisten muss

Wasser – Beobachten, Erkunden, Verstehen und Modellieren

S. 6–7 Mit TERENO die Umwelt beobachten

S. 8 Den Untergrund effizienter erforschen

S. 9 Standpunkt: Giftige Chemikalien in unseren Gewässern – Ein Problem von gestern?

S. 10-11 Der Fluss der Stoffe

S. 12 Interview: Führende Wasserforscher verbinden sich

S. 13 Den Dürren auf der Spur

S. 14 Dreidimensionaler Blick in den Untergrund

S. 15 SARISK macht Hochwasser berechenbar

S. 16-17 Der Kreislauf des Wassers

Wasser – Ressourcen managen

S. 18-19 Teuren Altlasten innovativ begegnen

S. 20 Smarte Lösungen für die Abwassernutzung

S. 21 Nomadenleben adé

S. 22 Wasserbilanzen präzise ermitteln

S. 23 So schnell verzeiht die Aue nicht

S. 24 Interview: Wir haben keine Zeit mehr zu diskutieren

S. 25 Standpunkt: Wassernutzungsabgaben erhalten und weiterentwickeln!

S. 26 Gemeinsam zu guten Gewässern

S. 27 Standpunkt: Zehn Jahre Umsetzung WRRL – Ein kritisches Fazit

S. 28-29 Kurzinformationen

S. 30-31 Wasser-Wissen

S. 32 UFZ im Überblick

WASSER – EIN GLOBALES THEMA

Seit Juli 2010 gibt es ein Menschenrecht auf sauberes Wasser – die praktische Umsetzung hinkt weit hinterher: Nach wie vor haben weltweit knapp eine Milliarde Menschen keinen Zugang zu sauberem Trinkwasser. 2,6 Milliarden Menschen leben ohne Toiletten und hygienische Abwasserentsorgung. Prognosen gehen davon aus, dass die Weltbevölkerung bis 2050 auf neun Milliarden Menschen anwachsen wird. Szenarien zum globalen Temperaturanstieg gehen von zwei bis sechs Grad Celsius bis 2100 aus, so dass die ohnehin vorhandenen Wasserprobleme sich verschärfen und neue hinzukommen werden. Darüber hinaus wird der steigende Bedarf an Nahrung und Energie in den Entwicklungs- und Schwellenländern zu einem weltweit deutlich höheren Wasserverbrauch führen und in vielen Regionen an die Grenzen der verfügbaren Ressourcen reichen. Die Folgen werden – je nach Ausgangssituation, klimatischer und geografischer Lage und politischen Rahmenbedingungen – ganz unterschiedlich ausfallen. Ebenso die Herausforderungen für Wissenschaft, Wirtschaft und Politik.

In den meisten mittel- und nordeuropäischen Ländern haben wir es primär mit Wasserqualitätsproblemen zu tun – jahrzehntelange Industrialisierung und intensive Landwirtschaft haben ihre chemischen Spuren hinterlassen sowie die Morphologie und die biologische Qualität zahlreicher Gewässer verändert. Die Einführung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie wirkt dem erfolgreich entgegen und hat inzwischen dazu geführt, dass 90 Prozent der Flüsse und Seen in Deutschland wieder einen guten chemischen Zustand haben. Ein guter ökologischer Zustand ist bisher jedoch nur bei 10 Prozent erreicht. Auch wird der Klimawandel Europa nicht völlig verschonen. Prognosen sagen für einige heute schon sehr trockene Regionen im Mittelmeerraum Niederschlagsrückgänge zwischen 20 und 40 Prozent bis zum Jahr 2070 voraus. Andernorts wiederum werden Extremniederschläge die Zahl der Hochwässer deutlich erhöhen. Wasser- und Abwassertechnologien müssen an diese veränderten Randbedingungen angepasst werden. Die besondere wissenschaftliche Herausforderung liegt dabei in der Entwicklung komplexer und trotzdem verlässlicher Observatorien- und Prognosesysteme für den Einzugsgebietsmaßstab mit Zeitperspektiven bis zu 100 Jahren.

In den ariden und semiariden Regionen Asiens, Afrikas oder Lateinamerikas haben wir es vor allem mit einem quantitativen

Wasserproblem zu tun, bei dem die zunehmende Verschlechterung der Wasserqualität erschwerend hinzukommt. Hier heißen die Herausforderungen: Effizientere Wassernutzung vor allem in der Landwirtschaft, innovative Technologien zur Wassereinsparung bzw. -wiederverwendung, präzise Wasserbilanzen sowie nachhaltiges Wassermanagement. Darüber hinaus geht es nach wie vor auch um die Erschließung neuer Wasserressourcen. Es wird zudem notwendig sein, wasserintensive Aktivitäten dorthin zu verlagern, wo Wasser ausreichend vorhanden ist, denn häufig exportieren wasserarme Länder wasserintensive landwirtschaftliche Produkte auf Kosten der knappen heimischen Wasserressourcen.

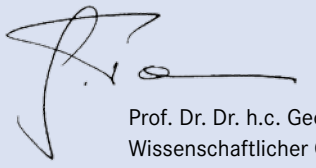
Doch so unterschiedlich diese Wasserprobleme weltweit auch sein mögen – in der Wissenschaft ist man sich einig, dass sie einen gemeinsamen Lösungsansatz haben: Ein integriertes Wasserressourcenmanagement (IWRM). Das bedeutet, dass qualitative, quantitative, ökologische, technische und soziale Aspekte des Wassermanagements integriert betrachtet werden müssen, dass Landnutzungs-, Klima- und demografischer Wandel zu berücksichtigen und die wasserabhängigen Sektoren der Wirtschaft einzubeziehen sind.

Die Voraussetzungen in der deutschen Wasserforschung sind dafür prinzipiell sehr gut: Wir entwickeln anspruchsvolle Technologien, Umweltbeobachtungs- und Frühwarnsysteme, hydrologische Modelle und besitzen viel Know-how in der Gewässeranalytik und Wasserwirtschaft. Jährlich fließen zwischen 200 und 250 Millionen Euro an öffentlicher Förderung und weitere Mittel aus der Wirtschaft in die deutsche Wasserforschung – verteilt auf mehr als 150 öffentlich geförderte Einrichtungen. Was allerdings bisher fehlt, sind langfristig angelegte Vernetzungsstrukturen, um das verteilt vorhandene Wissen optimal zu nutzen. Moderne anwendungsorientierte Wasserforschung erfordert die Integration vieler Einzeldisziplinen aus den Natur-, Ingenieur-, Wirtschafts- und Sozialwissenschaften und kann deshalb auch von keiner Institution kompetent alleine abgedeckt werden.

Das UFZ hat 2009 vom Helmholtz-Senat das Mandat erhalten, ein Konzept – die Water Science Alliance – zu entwickeln, das helfen soll, die beobachteten Defizite in der Kooperation bzw. Vernetzung zu überwinden. Mit dieser Wasserforschungsallianz soll ein verlässlicher Rahmen geschaffen werden, in dem ausgewählte, wichtige Themen der Wasserforschung integriert bearbeitet werden können, in dem die führenden Forschergruppen und Institutionen in geeigneter komplementärer Weise gemeinsame Forschungsziele und Strategien entwickeln und umsetzen und dabei Partner aus Behörden und der Wirtschaft von Beginn an einbeziehen. Außerdem sollen die Fähigkeiten der nächsten Generation von „Wasserwissenschaftlern“ gefördert werden. In Zusammenarbeit mit Akteuren der Wasserforschung und Wasserwirtschaft sowie den Forschungsförderern – dem Bundesforschungsministerium und dem Bundesumweltministerium sowie der Deutschen Forschungsgemeinschaft – wurden in einem „White Paper“ die Themenbereiche definiert, für die zunächst der größte Forschungsbedarf gesehen wird (siehe S. 28).

Das UFZ hat dabei explizit die Rolle des „facilitators“, d. h. des Initiators und Begleiters bei der Umsetzung, erhalten, weil es die integrierte Wasserforschung in den letzten Jahren erheblich ausgebaut hat und unter seinem Dach eine sehr breite und international anerkannte Kompetenz mit heute 17 direkt im Wasserbereich tätigen Departments entstanden ist. Die besondere Fachkompetenz des UFZ reicht dabei von der Gewässerbiologie und -chemie über die Ökotoxikologie, Bodenphysik und die Geohydrologie bis hin zur Einzugsgebietshydrologie sowie Modellentwicklung und Visualisierung auf allen Ebenen. Hinzu kommen Know-how in Mess- und Erkundungstechniken und eine langjährige Expertise in der sozioökonomischen Forschung, die in der Wasserforschung unverzichtbar sind.

Einen Einblick in aktuelle Projekte und Themenschwerpunkte aus der interdisziplinären Wasserforschung des UFZ gibt Ihnen die vorliegende Spezialausgabe unseres Newsletters. Ich wünsche Ihnen viel Vergnügen beim Lesen.



Prof. Dr. Dr. h.c. Georg Teutsch
Wissenschaftlicher Geschäftsführer des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung – UFZ

WAS MODERNE WASSERFORSCHUNG LEISTEN MUSS

Ob Wasser in ausreichender Menge und Qualität zur Verfügung steht, ist für den Menschen und die natürlichen Ökosysteme eine überlebenswichtige Frage. Obwohl Wasser global betrachtet scheinbar im Überfluss vorhanden ist (mehr als 70 Prozent der Erdoberfläche sind von Wasser bedeckt), so ist nur ein sehr kleiner Teil davon als Trinkwasser direkt aus Seen, Flüssen und Grundwasser nutzbar (etwa 0,3 Prozent). Wasser ist zudem weltweit ungleich verteilt und wird je nach Jahreszeit und Region unterschiedlich stark genutzt – als Trinkwasser, als Brauchwasser für die Industrie, zur Energieerzeugung oder für die Pflanzenproduktion in der Landwirtschaft. Und oft wird das Wasser gerade dort für besonders wasserintensive Nutzungen beansprucht, wo es ohnehin bereits knapp ist. Mit der weltweit wachsenden Bevölkerung verstärkt sich nicht nur direkt der Druck auf die Ressource Wasser, sondern er wächst auch indirekt durch die steigende Nahrungsmittel- und Konsumgüterproduktion und den höheren Energiebedarf. Hinzu kommen die Auswirkungen des Klimawandels mit sich ausweitenden Extremen wie Hochwasser und Dürren.

Wassermanagement: Global denken – regional handeln

Um den zukünftigen Herausforderungen zur Deckung der Wassernachfrage gewachsen zu sein, müssen integrierte Ansätze für die nachhaltige Nutzung und Bewirtschaftung von Wasserressourcen entwickelt und umgesetzt werden. Diese müssen angepasst sein an die unterschiedlichen regionalen Wasservorkommen, die unterschiedlichen Beanspruchungen und die zu erwartenden Änderungen in Verfügbarkeit und Bedarf.

In diesem Sinne hat das bekannte Motto „think globally, act locally“ eine ganz konkrete Bedeutung. So müssen die Nutzungen mit der jeweils verfügbaren Menge, der Qualität und den ökologischen Funktionen der Oberflächengewässer und des Grundwassers in Balance gebracht werden, um sie nachhaltig zu sichern.

Nicht nur die Wasserressourcen an sich, sondern auch die natürlichen Funktionen der aquatischen Systeme haben einen essenziellen Wert für den Menschen. Unsere Gewässer erbringen ökologische Dienstleistungen, wie Trinkwasser- und Energiebereitstellung, Transport- und Selbstreinigungskapazität, Nahrungsressourcen, ästhetische und kulturelle Werte und viele andere. Kein anderes System und keine Technologie können diese Funktionen ersetzen. Ein Beispiel soll dies verdeutlichen: Zwölf Prozent aller weltweit bekannten Tier- und Pflanzenarten leben in den Binnengewässern, obwohl diese nicht einmal ein Zehntausendstel des Wasservolumens der Erde beinhalten und nur einen proportional sehr geringen Teil der Erdoberfläche bedecken. Und zirka 41 Prozent der Fischarten und 25 Prozent aller Wirbeltierarten sind mehr oder minder direkt von Süßwasserökosystemen abhängig.

Ein modernes und nachhaltiges Management von Wasserressourcen kann somit nicht isoliert und nur bezogen auf den Sektor Wasserwirtschaft entwickelt und umgesetzt werden. Der Schlüssel liegt in Anpassungsstrategien, flexiblen Infrastrukturen und einer wesentlich höheren Ressourceneffizienz aller Wassernutzungen.

Wasserforschung: Mehr disziplinäre Forschung oder mehr Interdisziplinarität?

Was muss eine moderne Wasserforschung leisten? Kann sie sich den Herausforderungen der sich weltweit verschärfenden Wasserkrise(n) ernsthaft stellen? Im Prinzip ja: Sie ist sehr gut aufgestellt in ihren Einzeldisziplinen aus den Natur-, Ingenieur-, Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. Hier liegt gleichzeitig das Dilemma: in den „klassischen“ Disziplinen der Wasserforschung. Die Wasserforschung hat ein hervorragendes Analyse- und Modellverständnis physikalischer Prozesse oder biogeochemischer Reaktionen auf kleiner Skala, in einzelnen Gewässern oder unter kontrollierten Laborbedingungen. Sie entwickelt anspruchsvollste Messtechnik und produziert Messdaten in einer zeitlichen oder räumlichen Auflösung und in einer Menge, für die die Auswertungsmethoden noch gar nicht vorhanden sind. In der Gewässeranalytik können Stoffe in einer fast beliebigen Anzahl und in unvorstellbar geringen Mengen analysiert werden. Solche Entwicklungen in der Forschung sind für das Verständnis grundlegender Prozesse äußerst wichtig. Jedoch sind zur nachhaltigen Lösung der regionalen und globalen Wasserprobleme weiterführende, interdisziplinäre Ansätze notwendig. Ganz gleich, ob es um die Entstehung und Dynamik von Hochwasser, die effizientere Nutzung oder Speicherung des sogenannten grünen Wassers, das in Boden und Pflanzen steckt, den Transport und Verbleib von Nähr- und Schadstoffen, die Funktionen von aquatischen Ökosystemen oder das Management von Wasserquantität und -qualität unter den Bedingungen des globalen Wandels geht: Es handelt sich immer um komplex strukturierte und gesteuerte Um-

weltsysteme, in denen vielfältige Prozesse, Wechselwirkungen und Rückkopplungen stattfinden. Denn der Wasserkreislauf als Ganzes ist eben mehr als die Summe seiner Teile (siehe S. 16/17).

Interdisziplinarität ist aber kein Selbstzweck und bedeutet nicht, dass „alles mit allem" zu verbinden ist, bevor Aussagen getroffen werden können. Vielmehr besteht die Kunst interdisziplinärer Wasserforschung darin, eine integrative Betrachtung so anzulegen, dass diejenigen Systemstrukturen und -eigenschaften identifiziert und quantifiziert werden können, die für die Funktionen des Gesamtsystems bzw. für die jeweilige Fragestellung entscheidend sind. Das bedeutet weder, sich in den vielfältigen Detailprozessen zu verlieren, noch durch grobe Abstraktion unzulässige Vereinfachungen zu treffen. Vielmehr sind intelligente und vertrauenswürdige Synthesen gefragt, denn nur so können rationale Entscheidungsgrundlagen für das Wasser- und Umweltmanagement zur Verfügung gestellt werden. Und die sind zwingend notwendig, wenn es gilt, Lösungen zu finden, beispielsweise zur Steigerung der Effizienz verschiedener Wassernutzungen – ob in der Landwirtschaft (als „Wassernutzer Nr. 1"), der Trinkwasserversorgung, bei der Rohstoffgewinnung, in der industriellen Produktion oder bei der Abwasserreinigung.

Lösungsansätze einer modernen Wasserforschung

Für die so verstandene interdisziplinäre Wasserforschung bedeutet das, dass unsere wissenschaftlichen Methoden in der Lage sein müssen, zukünftige Entwicklungen globaler Wandelprozesse und deren Konsequenzen für unterschiedliche Skalen widerspruchsfrei, mit höherer Genauigkeit und größerer Verlässlichkeit vorherzusagen, als dies bisher möglich ist. Dazu ist es notwendig, einzelne dominante Prozesse so zu beobachten und zu analysieren, dass zuverlässige Prognosen für das Verhalten des ganzen Systems – z. B. als Reaktion auf Änderungen des Klimas oder der Landnutzung – getroffen werden können. Dabei spielen Modelle und Simulationswerkzeuge eine entscheidende Rolle. Sie sind unverzichtbar bei der Entwicklung und Überprüfung wissenschaftlicher Hypothesen und müssen zukünftig noch sehr viel stärker als bisher für System- und Prozessstudien genutzt werden. Um die dominanten Prozesse zu identifizieren und Modelle zu entwickeln, ist die Beobachtung von Umweltvariablen auf unterschiedlichen Skalen in Raum und Zeit die Grundlage – zum Beispiel mithilfe langer Beobachtungszeitreihen an entsprechend instrumentierten Beobachtungsstandorten (wie im Rahmen der Beobachtungsplattform TERENO, siehe S. 6/7). Von besonderem Interesse sind dabei nicht nur die klassischen Umweltkompartimente wie Luft, Wasser und Boden, sondern insbesondere die Übergangszonen zwischen Vegetationswasser, Boden- und Grundwasser sowie Oberflächengewässern. Denn hier finden auf kleinen Skalen verschiedene Schlüsselprozesse statt, die z. B. zur Entwicklung eines Hochwassers oder zur Verschlechterung der Wasserqualität beitragen.

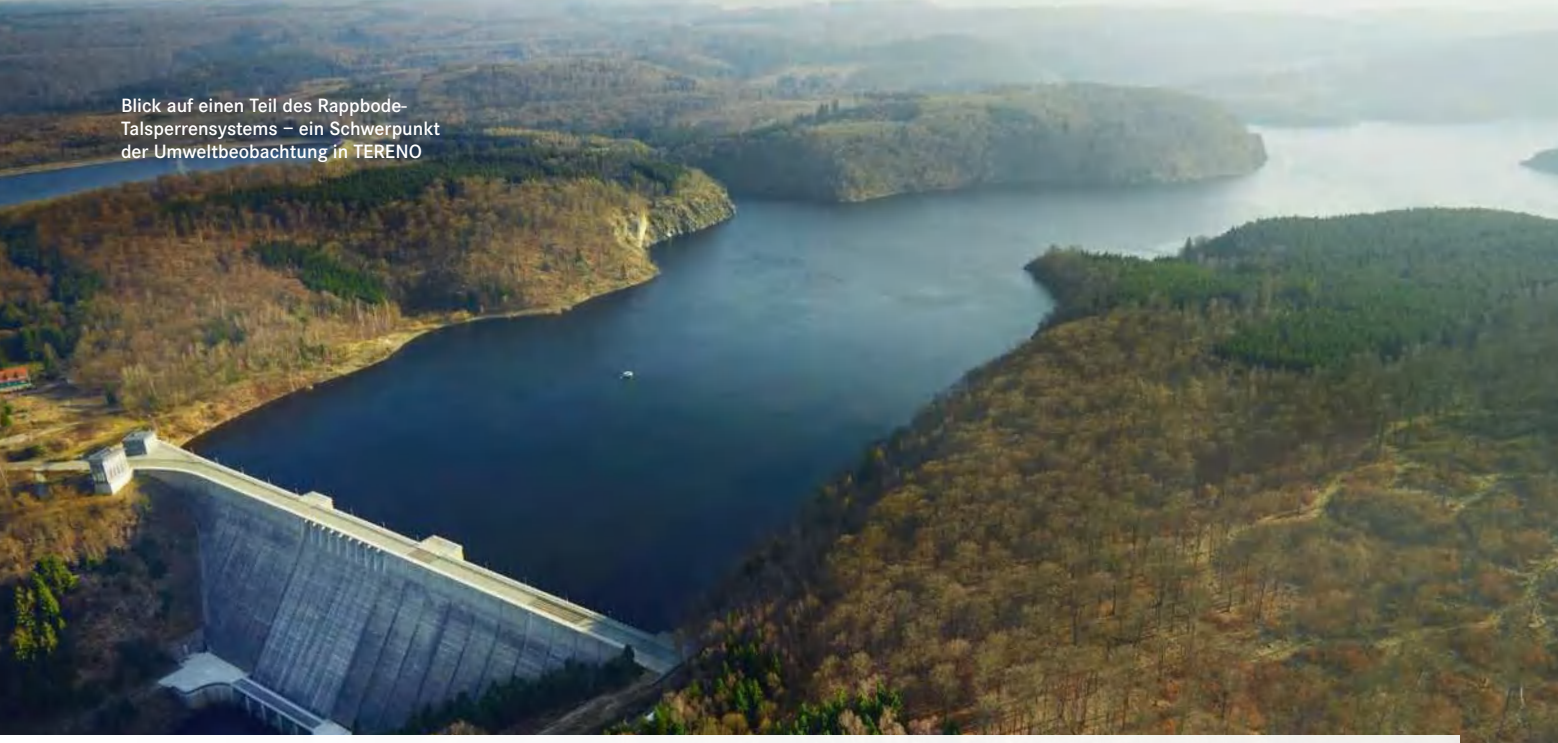
Dass die naturwissenschaftliche Forschung mit sozialwissenschaftlichen Aspekten verknüpft werden muss, ist in der Wasserforschung inzwischen unbestritten. Dabei geht es um entscheidende Fragen eines wirksamen Managements von Wasser. Welche Akteure, Institutionen und Verwaltungen sind an welchen Entscheidungsprozessen beteiligt und welche Rolle spielen sie dabei? Welche rechtlichen und ökonomischen Instrumente gibt es für die Steuerung einzelner Wassernutzungen (z. B. Regulierung der Wasserpreise)? Wie können sie besser aufeinander abgestimmt und wirksamer angewendet werden? Welche Rolle spielt der mehr oder weniger umweltbewusste Verbraucher? Welche Handhabungen und Anreize gibt es, Kostendeckungs- oder Verursacherprinzipien konsequenter einzusetzen? Wie funktioniert die Zusammenarbeit in internationalen Flussgebieten und wie kann der Interessenausgleich zwischen Anliegern am Ober- und Unterlauf von Flüssen organisiert werden? Die weltweit und regional sehr unterschiedlichen Wasserprobleme erfordern vielfältiges und anspruchsvolles Wissen, um effektiv handeln zu können. Dabei darf Eines nicht vergessen werden: Den Schlüssel, die Wasserprobleme nachhaltig zu lösen, haben letztendlich die Menschen und Zivilgesellschaften selbst in der Hand. Entsprechend wichtig sind die Aus- und Fortbildung sowie der Wissenstransfer aus der Wasserforschung in die relevanten gesellschaftlichen Bereiche. In diesem Sinne sind „Wasserforschung" und „Wasserwissen" eine untrennbare Einheit.

UFZ-Ansprechpartner:

Prof. Dr. Dietrich Borchardt
Leiter Dept. Aquatische Ökosystemanalyse und Management

Sprecher des UFZ-Forschungsbereiches „Nachhaltiges Management von Wasserressourcen"

e-mail: **dietrich.borchardt@ufz.de**



Blick auf einen Teil des Rappbode-Talsperrensystems – ein Schwerpunkt der Umweltbeobachtung in TERENO

MIT TERENO DIE UMWELT BEOBACHTEN

Nicht weniger als ein neues Erdbeobachtungs-Netzwerk ist das 2008 gestartete Projekt TERENO (**TER**restrial **EN**vironmental **O**bservatories). Mehrere Zentren der Helmholtz-Gemeinschaft haben sich darin zusammengeschlossen, um großräumig, ganzheitlich, interdisziplinär und methodisch vielfältig die langfristige Entwicklung der Umwelt zu erforschen. Dazu wird ein Mosaik aus Beobachtungen, Untersuchungen, Messergebnissen, Modellierungen und Experimenten zusammengefügt, das die Basis für die Vorhersage zukünftiger Entwicklungen bildet. TERENO wird vom Forschungszentrum Jülich (FZJ) koordiniert. Projektpartner sind das Helmholtz-Zentrum München (HZM), das Karlsruher Institut für Technologie (KIT), das Helmholtz-Zentrum Potsdam (GFZ), das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) sowie das UFZ.

Vier Regionen im Fokus

Im Fokus stehen vier Regionen Deutschlands, in denen langfristig erkundet wird, wie sich Klimaänderung und Landnutzungswandel regional auf Wasserkreisläufe, Klima und Wetter, biologische Vielfalt, Boden und Luftqualität auswirken. Dafür wird sowohl mobiles als auch stationäres Equipment eingesetzt. Darüber hinaus wird untersucht, welche sozioökonomischen Konsequenzen Veränderungen von Klima und Landnutzung haben, um gezielt Anpassungsstrategien entwickeln zu können.

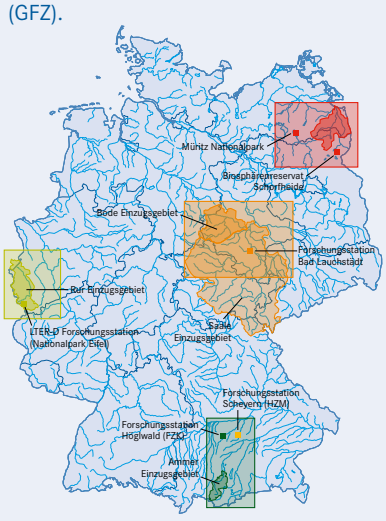
Inzwischen ist die Forschungsinfrastruktur des Netzwerkes fast komplett installiert und viele Beobachtungen, Untersuchungen und Messungen laufen bereits. Die Observatorien in den vier Beobachtungsgebieten im Nordostdeutschen Tiefland, dem Mitteldeutschen Tiefland einschließlich des Harz, der Eifel und der Voralpenregion sind unter anderem mit Wetterstationen, geophysikalischer Messtechnik, Radarsystemen zur Niederschlagsbeobachtung, Bodensensoren und Grundwassermesssystemen ausgestattet. Zeitgleich laufen Experimente, werden wissenschaftliche Modelle für die verschiedenen Umweltprozesse entwickelt und erprobt. Wichtiger Bestandteil der methodischen Arbeit in TERENO ist auch die Entwicklung von Konzepten, um Lücken zwischen den unterschiedlichen Maßstäben von Messung, Modell und Management schließen zu können.

Engmaschiges Untersuchungsnetz

Ein wichtiges Element von TERENO sind die sogenannten hydrologischen Observatorien. Der Blick ins Detail zeigt, wie großräumig und doch detailliert diese angelegt sind: „In jedem Einzugsgebiet, das die Basis eines hydrologischen Observatoriums bildet, werden Teileinzugsgebiete und innerhalb derer wiederum besonders intensiv beforschte Flächen bzw. Testgebiete definiert. So wollen wir die Datenausbeute über verschiedene Gebietsgrößen hinweg quantitativ und

Die vier TERENO-Untersuchungsgebiete in Deutschland

TERENO wird vom Forschungszentrum Jülich (FZJ) koordiniert. Projektpartner sind neben dem UFZ das Helmholtz-Zentrum München (HZM), das Forschungszentrum Karlsruhe (FZK), das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) sowie das Helmholtz-Zentrum Potsdam (GFZ).



UFZ Untersuchungsgebiet

FZJ Untersuchungsgebiet

FZK / HZM Untersuchungsgebiet

GFZ Untersuchungsgebiet

qualitativ optimieren“, erklärt Dr. Steffen Zacharias vom UFZ, der die Forschungsarbeiten im Mitteldeutschen Tiefland und Harz koordiniert. Die so gewonnenen detaillierten Daten werden miteinander verknüpft und gehen in Modelle und Szenarien ein.
Wie umfangreich die Untersuchungen sind, wird am Beispiel des UFZ-Beobachtungsgebietes deutlich: In drei Korridoren – entlang des Verlaufes der Bode bis in die Magdeburger Börde, von Leipzig über Halle bis zum Harz sowie im Bereich der Elbe-Auen – wird eine Fläche von fast 26.000 Quadratkilometern beforscht. Im Einzugsgebiet der Bode wurden drei Teileinzugsgebiete ausgewählt, die beispielhaft für unterschiedliche Bedingungen stehen: Im Sauerbach-Gebiet wird vorrangig die Kopplung zwischen Wasser und Stofftransport in einem landwirtschaftlich geprägten Einzugsgebiet untersucht; im Areal Schäfertal werden hydrologische Prozesse und deren Zusammenhänge auf verschiedenen Skalen erforscht, im Selke-Einzugsgebiet stehen der Wasserhaushalt eines Teileinzugsgebietes, seine Modellierung und auch Grundwasserprozesse im Zentrum der Untersuchungen. Im Waldgebiet Hohes Holz wird ein rund 50 Meter hoher Turm errichtet und mit Messinstrumenten versehen, um den Zusammenhang zwischen Sonneneinstrahlung, Wassertransport und CO_2-Austausch ermitteln zu können. Ein zusätzlicher Beobachtungsschwerpunkt wird derzeit an der Rappbode-Talsperre aufgebaut (siehe Infobox). „Von Bodenproben bis Fernerkundungen, von Wasserabflüssen bis Wetterbeobachtungen, von Beobachtungen bis Experimenten – mit TERENO können wir vielfältige Daten zusammenführen und interdisziplinär ‚übersetzen‘“, so Zacharias.

TERENO in der Mittelmeerregion

Basierend auf den Konzepten und Erfahrungen des TERENO-Projektes in Deutschland will man ab 2012 TERENO-MED, ein Observatorien-Netzwerk speziell für den mediterranen Raum, aufbauen, wobei der Schwerpunkt der Aktivität zunächst auf der Untersuchung des Wasserkreislaufs liegen wird. Die Gespräche mit Spanien, Italien, Griechenland und der Türkei laufen bereits, weitere Länder der Region, insbesondere auch in Nordafrika, werden dazu kommen. Acht bis zehn Observatorien sollen entstehen.
Im Nahen und Mittleren Osten ist das UFZ seit einigen Jahren mit diversen Forschungsprojekten schon aktiv. So wird in Jordanien die Wiederverwendung von Abwasser unter den dortigen Gegebenheiten erforscht (Projekt SMART, siehe S. 20). Und in Saudi-Arabien arbeiten UFZ-Wissenschaftler daran, eine hochpräzise Wasserbilanz zu erstellen (siehe S. 22). „In der Mittelmeerregion sind die Auswirkungen der Klimaveränderung bereits deutlich messbar. Vor allem die Sicherung der Wasserversorgung wird die größte Herausforderung sein“, so Zacharias. Deshalb sei es umso dringlicher, endlich die Daten zu gewinnen, die Vorraussetzung für ein integriertes Wasserressourcenmanagement in dieser Region sind. *Gundula Lasch*

MOBICOS – WASSERFORSCHUNG IM CONTAINER

In einem Beobachtungsschwerpunkt innerhalb des TERENO-Observatoriums am UFZ wollen die Forscher an der Rappbode-Talsperre ein Phänomen detaillierter untersuchen, das die Wasserwirtschaft weltweit beunruhigt: Die Menge an Huminstoffen nimmt in vielen Gewässern zu. Auch in Deutschland steigen seit etwa 15 Jahren in vielen Talsperren die Konzentrationen. Huminstoffe sind ungiftige Abbauprodukte von Pflanzen, doch für die Trinkwasseraufbereitung stellen sie ein Problem dar: sie färben das Wasser braun, sind schwer abbaubar und bei der Wasserdesinfektion mit Chlor können giftige Produkte entstehen. Um die Ursachen des Anstiegs der Huminstoffkonzentration in den Gewässern herauszufinden, installieren Wissenschaftler zusammen mit dem Talsperrenbetrieb Sachsen-Anhalt in den nächsten Monaten umfangreiche Messtechnik in und um die Rappbode-Talsperre.

Zentrales Element dieser Forschungsinfrastruktur ist MOBICOS (Mobile Aquatic Mesocosms): Das sind in oder an Gewässern stationierte mobile Container, in denen naturnahe Untersuchungen und Experimente durchgeführt werden können. „Das Oberflächenwasser wird im Container in verschiedene Versuchsbecken geleitet und kann dann dort untersucht oder experimentell – zum Beispiel durch die Zugabe von Nährstoffen oder Veränderung der Temperatur – beeinflusst werden“, erklärt Gewässerökologe Prof. Markus Weitere vom UFZ. „Die Container können universell zur Verbesserung des ökologischen Prozessverständnisses in fließenden, aber auch stehenden Gewässern eingesetzt werden. Dabei soll MOBICOS eine Plattform bilden, die auch von externen Kooperationspartnern genutzt werden kann“, so Weitere. Es gehe nicht nur darum, Vorgänge zu beobachten, sondern zu verstehen, warum sie stattfinden, formuliert er den wissenschaftlichen Anspruch. Der Einsatz am Rappbode-Talsperrensystem ist also nur eine von vielen verschiedenen Nutzungsmöglichkeiten der mobilen „Experimentierboxen“.

Aufbau von Lysimetern am TERENO-Standort Sauerbach im Harz. Mithilfe der Lysimeter untersuchen die Wissenschaftler den Einfluss des Klimawandels auf den Boden.

UFZ-Ansprechpartner:

Dr. Steffen Zacharias
Dept. Monitoring- und Erkundungstechnologien

e-mail: **steffen.zacharias@ufz.de**

mehr Informationen:
http://teodoor.icg.kfa-juelich.de/overview/copy_of_overview-de

Direct-Push-Technologien erlauben eine kosteneffiziente und schnelle Probenahme und Datenerhebung in unverfestigten Böden und Sedimenten.

DEN UNTERGRUND EFFIZIENTER ERFORSCHEN

Nicht immer ist Wasser deutlich vor dem Auge des Betrachters erkennbar: In kleinen Poren und Klüften sowie größeren Hohlräumen unter der Erdoberfläche befindet sich Grundwasser, das in den meisten Regionen der Welt unverzichtbar für die Trinkwasserversorgung ist. Doch was passiert, wenn Umweltschadstoffe ins Grundwasser gelangen oder mehr Wasser aus dem Untergrund entnommen wird, als sich neu bildet?
Um derartige Fragen beantworten zu können, müssen zunächst die im Untergrund ablaufenden Prozesse erkundet sowie Ursachen und Zusammenhänge aufgedeckt werden.

Im Falle von oberflächennahen Grundwasserressourcen in unverfestigten Sedimenten eröffnen Direct-Push-Technologien für solche Untersuchungen außerordentliche neue Möglichkeiten. Diese Technologien basieren darauf, dass ein Sondiergestänge für Messungen, Probennahmen oder weitere Installationen in den Boden getrieben wird. Entscheidende Vorteile gegenüber herkömmlichen Bohr- und Sondierverfahren sind die Schnelligkeit, die Messung von Parametern direkt am Lockergestein und die hohe vertikale Auflösung. So kann innerhalb von 30 Minuten mit einer Auflösung von fünf Zentimetern ein 15 Meter tiefes Profil der elektrischen Leitfähigkeit – einem Indikator für die Unterscheidung zwischen verschiedenen Lockersedimenten – gemessen werden. Mit dem klassischen Bohren und der Auswertung von Bohrkernen wären dazu bei gleicher vertikaler Auflösung mehrere Stunden erforderlich.

Das Potenzial der Direct-Push-Technologien ist damit aber bei weitem nicht ausgeschöpft. Eine Herausforderung besteht in der robusten Miniaturisierung von verschiedenen Messtechnologien für den Einsatz in Sondiergestängen mit einem Durchmesser von weniger als sechs Zentimetern. So entwickeln die Wissenschaftler des UFZ neben Sonden zur Messung von chemischen und biologischen Parametern beispielsweise auch Sonden, mit denen sie die hydraulische Durchlässigkeitsverteilung charakterisieren können. Die Kenntnis dieser Verteilung ist wichtig, um Ausbreitungsprozesse in Grundwasserleitern besser zu verstehen und damit auch Gefährdungen bewerten zu können. Bei der Entwicklung nutzen die Wissenschaftler Funktionsprinzipien, auf denen auch klassische Pumpversuche basieren. Doch während bei diesen die Durchlässigkeitswerte nur für die gesamte Mächtigkeit eines Grundwasserleiters ermittelt werden, ermöglichen die Direct-Push-Sonden eine vertikale Auflösung im Dezimeterbereich. Ergebnisse aus Felduntersuchungen zeigen, dass die hydraulische Durchlässigkeit in dieser Skala um mehrere Zehnerpotenzen variieren kann. Da dementsprechend auch die Menge des strömenden Grundwassers um mehrere Zehnerpotenzen schwankt, sind detaillierte Informationen zur Variabilität der hydraulischen Durchlässigkeit im Hinblick auf die belastbare Abschätzung von Gefährdungen unbedingt erforderlich.

Im Verhältnis zur großflächigen Ausdehnung eines Grundwasserleiters sind jedoch Direct-Push-Untersuchungen, ebenso wie klassische Bohrungen, nur punktuelle Nadelstiche. Es bleibt die Herausforderung, zu wissen, wo man bohren muss. Deshalb beschäftigen sich die Forscher ebenso mit der Weiterentwicklung geophysikalischer Verfahren. In dem sie etwa von den klassischen Konzepten mit gesteckten Sensoren zu mobilen Schleppplattformen übergehen und dabei verschiedenste Verfahren kombinieren, können Gebiete in einer Größe von 25 Hektar an einem Messtag mit mehreren Parametern dreidimensional charakterisiert werden. Das ist um ein Vielfaches schneller als alles, was bisher möglich war. Die so gewonnenen Strukturinformationen werden genutzt, um in einem adaptiven Prozess die richtigen Ansatzpunkte für die Direct-Push-Untersuchungen zu finden.
Kombiniert werden die schleppgeophysikalischen Messtechniken und die Direct-Push-Technologien in der UFZ-Forschungsplattform MOSAIC. Die Abkürzung steht für „**Mo**del Driven **S**ite **A**ssessment, **I**nformation and **C**ontrol“ und betont die Grundidee der modellgetrieben und zweckorientierten Anwendung der verschiedenen Messtechnologien. *Peter Dietrich und Susanne Hufe*

UFZ-Ansprechpartner:

Dr. Peter Dietrich
Leiter Dept. Monitoring- und Erkundungstechnologie

e-mail: **peter.dietrich@ufz.de**

mehr Informationen:
www.ufz.de/met

STANDPUNKT: GIFTIGE CHEMIKALIEN IN UNSEREN GEWÄSSERN – EIN PROBLEM VON GESTERN?

Dr. Werner Brack ist Leiter des Departments Wirkungsorientierte Analytik am UFZ. Seine Forschungsschwerpunkte sind die Identifizierung und Bewertung giftiger Chemikalien in Wasser und Sedimenten und die Entschlüsselung von Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen Schadeffekten und den zugrunde liegenden stofflichen Belastungen. 2005-2010 koordinierte er das EU-Projekt MODELKEY mit 26 Partnern aus 14 Ländern (www.modelkey.ufz.de). Derzeit leitet er eine Arbeitsgruppe zur wirkungsorientierten Identifizierung neuer Schadstoffe im europäischen Netzwerk NORMAN (www.norman-network.net).

e-mail: werner.brack@ufz.de

Flüsse mit hohen Schadstoffkonzentrationen und akut giftiger Wirkung auf Fische und andere Wasserlebewesen sind in Europa selten geworden. Moderne Produktionsverfahren mit geringen Emissionen, innovative Klärtechnik, zahlreiche Herstellungs- und Verwendungsverbote für besonders problematische Stoffe und schließlich auch die Schließung oder Verlagerung von emissionsintensiven Industriezweigen haben die chemische Belastung vieler Gewässer deutlich reduziert. So geht man in Deutschland davon aus, dass sich derzeit 88 Prozent der etwa 10.000 Oberflächengewässer in einem guten chemischen Zustand befinden (WRRL, siehe S. 27). Doch wie passt diese Erfolgsmeldung mit der Feststellung zusammen, dass sich lediglich 10 Prozent dieser Gewässer in einem guten ökologischen Zustand befinden? Eine Erklärung dafür ist, dass nicht nur die derzeit von den Behörden überwachten Chemikalien den ökologischen Zustand von Gewässern beeinflussen, sondern darüber hinaus andere, bislang nicht beachtete chemische Substanzen Wirkung zeigen und außerdem Faktoren wie Flussausbau, Nährstoffe oder die Invasion fremder Tier- und Pflanzenarten eine Rolle spielen.

Bleiben wir jedoch bei der Chemie. Der chemische Zustand von Gewässern wird momentan auf der Grundlage von 41 als prioritär definierten Stoffen überwacht, die einen festgelegten Grenzwert nicht überschreiten dürfen. Die Belastung unserer Umwelt mit Chemikalien ist aber wesentlich vielfältiger. Typische Umweltproben enthalten zehntausende verschiedener chemischer Verbindungen. Etwa 30.000 synthetische Stoffe werden in Alltagsprodukten eingesetzt, eine deutlich größere Anzahl in der Industrie. Täglich kommen neue Stoffe dazu und ein Großteil davon landet früher oder später in der Umwelt. Schaut man sich die 41 überwachten Stoffe genauer an und vergleicht sie mit den Chemikalien, die heute im Einsatz sind, offenbart sich ein weiteres Problem: Die Stoffliste ist nicht aktuell. Das lässt sich am Beispiel der Pflanzenschutzmittel gut zeigen. Von den 15 überwachten Pestiziden werden in Deutschland nur noch vier verwendet. Umgekehrt befinden sich unter den 35 in der Landwirtschaft mengenmäßig bedeutendsten Pestiziden nur zwei Stoffe auf der Prioritätenliste. Es ist daher kein Wunder, dass der chemische Zustand laut WRRL wenig über die tatsächliche Belastung unserer Gewässer mit giftigen Stoffen aussagt, und die chemischen Analysenergebnisse oft nicht mit den messbaren Schadwirkungen auf Wasserorganismen korrelieren. Eine Erweiterung der Stoffliste, wie sie heute auf europäischer Ebene diskutiert wird, und die zusätzliche Überwachung sogenannter flussgebietsspezifischer Stoffe sind also dringend erforderlich. Da sich aber allein schon aus ökonomischen Gründen nicht alle chemischen Substanzen überwachen lassen, lauten zwei entscheidende Fragen: Was muss sich an der Liste der 41 in Europa überwachten Stoffe ändern und was darüber hinaus?

Auf der Ebene der Lebensgemeinschaften lässt sich mit zunehmender chemischer Belastung der Rückgang empfindlicher Arten und auch die Beeinträchtigung wichtiger Funktionen des Ökosystems, wie etwa der Abbau abgestorbener Tiere und Pflanzen beobachten. Gleichzeitig zeigen die biologischen Wirkungstests, die wir im Rahmen des vom UFZ koordinierten EU-Projekts MODELKEY durchgeführt haben, dass Zellen und Organismen nicht nur auf Chemikalien, die in großer Menge vorkommen, reagieren, sondern auch auf Chemikalien in sehr geringen Konzentrationen, zum Teil weit unter den offiziell festgelegten Belastungsgrenzen. Und selbst wenn eine unmittelbare direkte Wirkung ausbleibt, kann es im Zusammenspiel mit anderen Stressfaktoren zu indirekten Effekten kommen. Das zeigt ein bekanntes Beispiel aus Nordamerika zum weltweiten Rückgang von Amphibienarten. Dort wurde nachgewiesen, dass Pflanzenschutzmittel das Immunsystem von Kaulquappen hemmen und sie dadurch gegenüber den Larven eines parasitischen Plattwurms wesentlich anfälliger sind. Das Pflanzenschutzmittel hat also indirekt die Kaulquappen geschädigt, indem es die Beziehung zwischen Wirt und Parasit aus dem Gleichgewicht gebracht hat.

Es gibt damit klare Indizien dafür, dass vor allem die heute in vielen Ländern Europas typische Belastung mit komplexen chemischen Stoffmischungen in relativ niedrigen Konzentrationen im Konzert mit anderen Stressoren den ökologischen Zustand unserer Gewässerökosysteme, deren Biodiversität und Funktionen beeinträchtigt. Das liefert auch eine Erklärung für die momentan zu beobachtende Diskrepanz zwischen chemischem und ökologischem Zustand deutscher Gewässer. Neben der Aktualisierung der Stofflisten ist deshalb aus meiner Sicht dringend eine Erweiterung der Gewässerüberwachung um ein intelligentes Wirkungsmonitoring erforderlich. Darüber hinaus ist ein besseres Verständnis und die Vorhersage von Schadwirkungen in multiplen Stresssituationen eine der zentralen Herausforderungen der Schadstoffforschung in den nächsten Jahren.

Um Stoffflüsse zu ermitteln, müssen über einen langen Zeitraum kontinuierlich viele Daten zur Konzentration einzelner Stoffe ermittelt werden. Zum Teil geschieht das über stationäre Messstationen. Oft müssen die Wissenschaftler aber auch zur Probenahme selbst „in den Fluss“.

DER FLUSS DER STOFFE

Bäche und Flüsse werden schon seit Menschengedenken für den Transport von Gütern genutzt. Doch nicht nur auf dem Wasser, auch im Wasser und zwischen Wasser, Boden und Atmosphäre werden Stoffe transportiert: feste und gelöste, anorganische und organische, gewünschte und unerwünschte. Die Palette reicht von Nährstoffen über Schwebstoffe bis hin zu den unterschiedlichsten Schadstoffen aus Industrie und Landwirtschaft oder Haushalten. Beim Transport dieser Stoffe im Wasser finden komplexe biologische, chemische und physikalische Wechselwirkungen statt, die deren Verbleib, Abbau und Wirkung in der Umwelt bestimmen. Und genau damit befasst sich eine Gruppe von Hydrogeologen, Biologen und Chemikern des UFZ. Denn viele dieser Stoffe stellen zum einen ein Problem für die Wasserqualität dar, z. B. bei der Gewinnung von Trinkwasser, die immer aufwändiger und damit teurer wird, je mehr unerwünschte Substanzen entfernt werden müssen. Zum anderen beeinträchtigen sie auch die natürlichen Funktionen aquatischer Ökosysteme wie Nahrungsnetze oder das Filter- und Selbstreinigungsvermögen.

Den Wissenschaftlern geht es aber nicht nur darum, Prozesse wie die Grundwasserdynamik, den Austausch zwischen Grund- und Oberflächenwasser oder die Ausbreitung und den Abbau von Schadstoffen besser zu verstehen. Sie wollen diese Stoffflüsse auch quantifizieren und vorhersagen können. „Derartig komplexe hydrologische und biogeochemische Prozesse durch Messdaten zu beschreiben und schließlich in Computermodellen zu simulieren, ist eine echte Herausforderung, aber auch die einzige Möglichkeit, verlässliche Prognosen machen zu können“, sagt Hydrogeologe Dr. Jan Fleckenstein. Solche Prognosen werden benötigt, weil sie die Basis für Managemententscheidungen sind, beispielsweise im Zusammenhang mit der Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL, siehe S. 27) oder in Bezug auf Anpassungsstrategien an den Klimawandel auf der Ebene ganzer Flusseinzugsgebiete.

Die für großräumige Stoffflüsse relevanten Schlüsselprozesse spielen sich jedoch oft auf viel kleineren Skalen ab, zum Beispiel in den obersten Zentimetern der Flussbettsedimente, im Porenraum von Böden oder in der Übergangszone zwischen Grund- und Oberflächenwasser. Einzelne chemische Prozesse wie der Abbau von Nitrat durch die sogenannte Denitrifikation sind durchaus bekannt. Aber das komplexe Zusammenspiel mehrerer Prozesse, an denen eine Vielzahl von Stoffen unter sich dynamisch ändernden hydrologischen und biogeochemischen Randbedingungen (z. B. Fließgeschwindigkeit, Sauerstoffgehalte) beteiligt ist, wird bisher nur unzureichend verstanden und ist messtechnisch schwer zu erfassen. Das ist aber eine Voraussetzung, um zuverlässige Entscheidungsgrundlagen für ganze Einzugsgebiete ableiten zu können, z. B. wo und wie Flussrenaturierungen sinnvoll sind, um Pufferzonen für den natürlichen Nitratabbau zu schaffen, oder bei der Ausweisung von Schutzzonen für Trinkwasserbrunnen.

Zwischen Fluss und Grundwasser

An der Selke, einem Nebenfluss der Bode im TERENO-Untersuchungsgebiet (siehe S. 6/7), studieren die UFZ-Forscher, wie morphologische Strukturen im Flussbett, wie etwa Kiesbänke und Meanderschlaufen, den Austausch von Flusswasser mit dem Sediment beeinflussen. Dieser sogenannte hyporheische Austausch bringt Flusswasser in den porösen Untergrund, wo aufgrund langsamerer Fließgeschwindigkeiten und der Mischung mit zuströmendem Grundwasser, das eine andere chemische Zusammensetzung und Temperatur hat, (Schad)stoffe abgebaut oder durch Redoxprozesse umgewandelt werden. Dieses natürliche Selbstreinigungspotenzial von Flüssen kann durch Veränderungen in der Flussbettmorphologie (z. B. Begradigung von Flüssen) oder Eingriffe in die Grundwasserdynamik (z. B. verstärktes Abpumpen von Grundwasser für landwirtschaftliche Bewässerung) gestört werden. Über einen etwa 300 Meter langen Flussabschnitt der Selke zeichnen die Wissenschaftler mit permanent installierten Messgeräten die Druckverhältnisse (hydraulische Potenziale) an der Flusssohle, im Sediment und im angrenzenden Grundwasserleiter sowie relevante physiko-chemische Parameter wie Sauerstoffgehalt, elektrische Leitfähigkeit und Temperatur in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung auf. Gradienten im hydraulischen Potenzial verraten ihnen, wohin und wie schnell das Wasser im Untergrund fließt. Die chemischen Parameter geben Aufschluss über das chemische Milieu, in dem die Stoffe transportiert werden. Mit den Daten wollen die Wissen-

schaftler abschätzen, welches Abbau- und Transformationspotenzial die Übergangszone zwischen Fluss und Grundwasser hat. Mit einem Simulationsmodell schließlich quantifizieren sie Auswirkungen klimatisch bedingter Veränderungen wie Temperatur und Abfluss auf den hyporheischen Austausch sowie möglicher Veränderungen der Flussbettmorphologie und der Grundwasserdynamik.

Dem Nitrat auf der Spur

Am Sauerbach, einem kleinen landwirtschaftlich geprägten Bach im Bode- und TERENO-Untersuchungsgebiet, haben die UFZ-Forscher das Nitrat ins Visier genommen. Nitrat aus der Landwirtschaft stellt in vielen Teilen Europas nach wie vor eine Gefährdung für die Trinkwasserqualität dar. Die Nitratkonzentrationen im Quellwasser, das den Sauerbach speist, liegen bereits über den Grenzwerten der Trinkwasserverordnung. „Unsere regelmäßigen Probenahmen und Analysen einer Vielzahl chemischer Inhaltsstoffe und Parameter hat ergeben, dass die Nitratkonzentration entlang der Fließstrecken des Bachs signifikant zurückgeht. Wir wollen wissen, warum. Wird Nitrat in der hyporheischen Zone abgebaut? Oder sinkt die Konzentration durch Verdünnung mit Grundwasser oder Wasser aus landwirtschaftlichen Drainagen?“, fragt Jan Fleckenstein. Der Sauerbach ist auch ein schönes Beispiel dafür, wie die hydrologische Dynamik Stoffflüsse beeinflussen kann. Unter sehr feuchten Bedingungen und während starker Niederschläge kann es temporär zum Zutritt von nitratarmem Wasser in den Bach aus nicht permanent am Abflussgeschehen beteiligten Bereichen des Gebiets kommen, was die Nitratkonzentrationen im Bachwasser deutlich verringert. Die Entschlüsselung derartig komplexer Dynamiken ist wichtig, um die Auswirkungen von Klimaveränderungen auf Stoffflüsse adäquat abschätzen zu können.

Wenn Huminstoffe zum Problem werden

In der Rappbodetalsperre im Harz, der größten Trinkwassertalsperre Deutschlands, werden – wie übrigens überall auf der Welt – seit einigen Jahren immer höhere Konzentrationen von gelöstem organischen Kohlenstoff (dissolved organic carbon = DOC) verzeichnet. „DOC entsteht bei der Umwandlung von Huminstoffen, die wiederum Abbauprodukte von Pflanzen sind, und wird durch Flüsse und Bäche und Abfluss an der Landoberfläche in die Talsperre eingetragen“, erklärt Gewässerökologe Dr. Karsten Rinke. Sind Huminstoffe in größerer Konzentration im Wasser vorhanden, können sie bei der Filtration von Rohwasser zu einem verfahrenstechnischen Problem werden, denn je mehr Huminstoffe vorhanden sind, desto schwieriger und teurer wird die Fällung, was sich letztlich in einem höheren Wasserpreis bemerkbar macht. Noch problematischer ist es, wenn an sich nicht giftige Huminsäuren bis in das sogenannte Reinwasser gelangen. „Unser Trinkwasser wird mit Chlor desinfiziert und dabei entstehen chlorierte Kohlenwasserstoffe als Desinfektionsnebenprodukte, die giftig und damit ein Gesundheitsproblem sind“, sagt Rinke. Nun wollen die Forscher in einer Langzeituntersuchung herausfinden, wo genau die Quellen des DOC sind, warum sie in immer stärkerem Maße ins Wasser gelangen und wie lange der Trend noch anhalten wird. Zurückliegende Forschungen deuten darauf hin, dass der DOC-Eintrag in Fließgewässer durch Prozesse in vermoorten Flussniederungen gesteuert wird. Rund um die Talsperre wurden deshalb neun Messstationen eingerichtet und ab diesem Jahr werden alle Zu- und Abflüsse der Talsperre als Teil des TERENO-Projekts beobachtet.

Ganzheitliches Verständnis notwendig

Eingriffe des Menschen in natürliche Stoffkreisläufe, Klima- und Landnutzungsänderungen sowie das Auftreten neuer Schadstoffe in der Umwelt verändern die Randbedingungen der Prozesse, die die Stoffflüsse steuern. „Die Quantifizierung und Prognose von Stoffflüssen in Einzugsgebieten ist eine komplexe, interdisziplinäre Herausforderung, für die wir jedoch mit den zahlreichen in der Wasserforschung tätigen Departments am UFZ gut aufgestellt sind“, meint Fleckenstein. Neben der Entwicklung von Werkzeugen und Methoden zur Abschätzung und Prognose von Stoffflüssen befassen sich die Wissenschaftler auch mit Methoden zur Bewertung der Schadwirkung von Stoffen auf aquatische Ökosysteme als Indikator für die Wasserqualität (siehe Infobox). „Zu einem ganzheitlichen Verständnis von Wasser- und Stoffflüssen und deren Wirkungen in der Umwelt können wir nur gemeinsam gelangen“, sagt Fleckenstein. „In diese Richtung sind wir unterwegs.“

Jörg Aberger und Doris Böhme

SPEAR – SPECIES AT RISK

Wenn sich Pestizide oder andere Stoffe im Wasser ausbreiten, hat das unmittelbare Auswirkungen auf die dort siedelnden Lebewesen. Mikroben und andere Kleinstlebewesen wie Insekten halfen dem Biologen Dr. Matthias Liess und seinen Kollegen, ein Instrument – SPEAR – zu entwickeln, mit dem der Einfluss von Pestiziden auf die Lebewesen und die Qualität des Wassers gemessen werden kann.

Zunächst ermitteln die Forscher, welche Arten in welcher Anzahl zum Beispiel an Flüssen vorkommen. Da bekannt ist, wie die Spezies auf Schadstoffe reagieren – ob sie abwandern, ob sich ihr Vermehrungsverhalten ändert und wie empfindlich sie auf verschiedene Schadstoffe reagieren, müssen diese regelmäßig beobachtet werden. Diese Aufgabe übernehmen die Wasserwirtschaftsämter für die in ihren Zuständigkeitsbereichen liegenden Gewässer und die darin vorkommenden Arten. Die gewonnen Daten tragen sie in den SPEAR-Rechner ein, der die Wasserqualität überwacht. Gibt es signifikante Veränderungen, können von den zuständigen Behörden sofort Maßnahmen ergriffen werden. Derzeit sind die Wissenschaftler dabei, das Instrumentarium weiterzuentwickeln, um sogar einzelne Stoffgruppen, die in Pestiziden verwendet werden, identifizieren zu können. Und damit ist die Entwicklung noch keineswegs abgeschlossen: SPEAR kann so angepasst werden, dass Industrieschadstoffe, Versalzungen oder auch Schwermetalle ausgemacht werden können.

www.systemecology.eu/SPEAR/contact.php

UFZ-Ansprechpartner:

- **Dr. Jan Fleckenstein**
  Leiter Dept. Hydrogeologie
  e-mail: **jan.fleckenstein@ufz.de**
- **Dr. Karsten Rinke**
  Leiter Dept. Seenforschung
  e-mail: **karsten.rinke@ufz.de**
- **PD Dr. Matthias Liess**
  Leiter Dept. System-Ökotoxikologie
  e-mail: **matthias.liess@ufz.de**

Prof. Dr. Peter Grathwohl studierte bis 1985 Geologie an der Universität in Tübingen und promovierte dort 1988 zu chlorierten Kohlenwasserstoffen in der ungesättigten Bodenzone.
Nach einem Postdoc-Aufenthalt 1989/1990 an der Stanfort University (USA) kehrte er an die Universität Tübingen zurück, wo er seitdem wissenschaftlich tätig ist – seit 1996 als Professor für Hydrogeochemie und seit 2010 als stellvertretender Dekan der fusionierten mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät. Prof. Grathwohl ist Mitglied der UBA-Kommission Bodenschutz und leitet innerhalb der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften die Arbeitsgruppe „Wasserbeschaffenheit“ im Projekt „Georessource Wasser“.

FÜHRENDE WASSERFORSCHER VERBINDEN SICH

Was verbirgt sich hinter “WESS”?
WESS steht für Water and Earth System Science. Es ist eine strategische Allianz der drei Baden-Württembergischen Universitäten Tübingen, Stuttgart und Hohenheim mit dem UFZ zum Thema Wasser. Darüber hinaus pflegt die Allianz enge Verbindungen zu internationalen Wasserzentren, unter anderem dem Department of Earth Sciences der University of Waterloo, Kanada, und dem Catalan Institute for Water Research (ICRA), Gerona, Spanien. Der inhaltliche Focus liegt auf den Auswirkungen sich verändernder Umweltbedingungen auf den Wasserkreislauf und auf die Stoffflüsse in Wasser, Boden und Atmosphäre.

Welche Kompetenzen bringen die einzelnen Partner ein?
Alle vier Partner haben europaweit führende Wasserforschungsgruppen. Deren Kernkompetenzen liegen in unterschiedlichen Themenbereichen und die verbinden sich innerhalb der Allianz arbeitsteilig über mehrere Jahre. So bringt das Zentrum für Angewandte Geowissenschaften (ZAG) der Universität Tübingen seine Expertise aus den Bereichen Hydrogeologie, Geochemie und Schadstoffforschung ein. Die Stuttgarter Kollegen konzentrieren sich eher auf Umweltanalytik und Modellierung. Die Wissenschaftler aus Hohenheim steuern ihr Know how aus den Bereichen Bodenforschung, Wetter- und Klimaforschung sowie Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Landoberfläche bei. Und das UFZ bringt seine Stärken auf den Gebieten der Erkundung, des Monitorings, der Modellierung und Visualisierung von Prozessen in aquatischen Ökosystemen sowie des Integrierten Wasserressourcenmanagements (IWRM) ein. Wir ergänzen uns aber nicht nur fachlich, sondern auch in unseren Strukturen. So hat das UFZ als Helmholtz-Zentrum Zugang zu Methoden und Infrastruktur, die wir als Universitäten nicht vorhalten können. Und wir haben dadurch, dass wir ausbilden, den Zugang zu exzellenten jungen Wissenschaftlern.

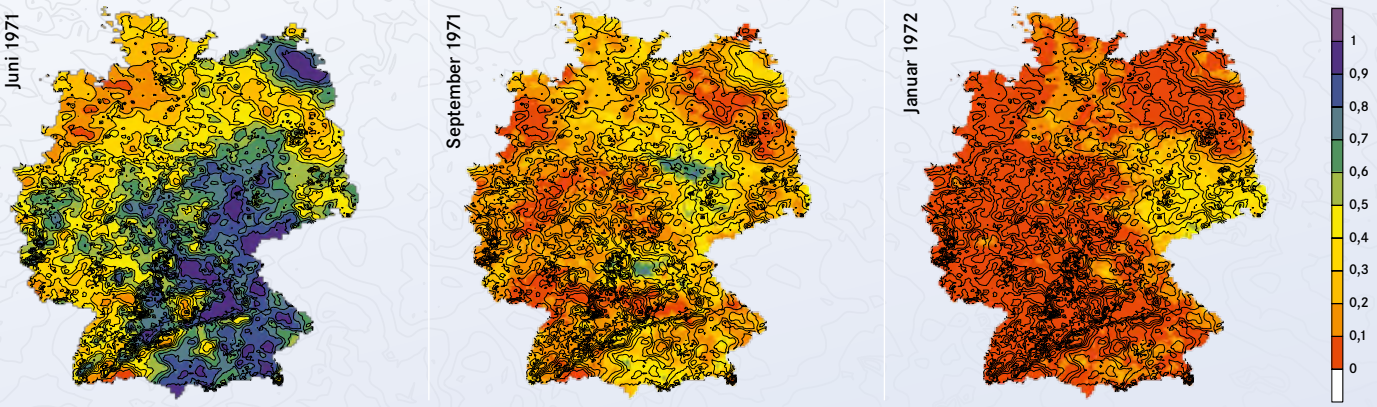
Wie wird WESS finanziert?
Die Finanzierung, das sind bis 2013 3,6 Millionen Euro, kommt über das UFZ zu 50 Prozent vom Bund. Die anderen 50 Prozent steuert das Land Baden-Württemberg bei.

In welche Projekte fließt das Geld?
Wir nehmen derzeit vier unterschiedlich geprägte Flusseinzugsgebiete in Deutschland unter die Lupe, die sich in Klima und Landnutzung unterscheiden. In Mitteldeutschland untersuchen wir Wasserflüsse und physikalische Parameter im Einzugsgebiet der Bode, einem der großen Forschungsobservatorien des UFZ. In Süddeutschland schauen wir uns die Stoffflüsse in drei Nebenflüssen des Neckars an: dem Goldersbach, nahezu vollständig in einem Naturpark gelegen, der Ammer, die ein landwirtschaftlich sehr intensiv genutztes Gebiet durchfließt, und der Körsch, in welche die Überläufe vieler Kläranlagen der großen Gemeinden auf der Filderebene im Stuttgarter Raum münden.

Was heißt „anschauen“?
In den süddeutschen Untersuchungsgebieten haben wir bislang 25 Messstationen installiert, an denen einmal pro Monat Proben genommen und auf zirka 120 Parameter untersucht werden. Neben gängigen Parametern wie pH-Wert, Leitfähigkeit oder Temperatur zählt dazu eine große Palette an anthropogenen Schadstoffen. Dazu gehören Chemikalien, die aus der Landwirtschaft kommen, Substanzen, die durch die Haushalte abgegeben werden, und schließlich Stoffe, die von der Industrie emittiert werden. Diese aktuellen Messwerte ergänzen wir durch Datenreihen, die weit in die Vergangenheit reichen. Dabei sind wir sehr auf die Mitarbeit der lokalen Wasserversorger angewiesen. Doch in der Regel klappt das gut, denn auch sie haben ein großes Interesse an unseren Ergebnissen. Das wird zum Beispiel deutlich am Problem steigender Nitrat- oder Pestizidgehalte im Grundwasser, die in vielen Regionen zu beobachten sind und zur Herausforderung für die Trinkwasserversorgung werden. Immerhin greift man in Deutschland beim Trinkwasser zu fast 75 Prozent auf Grundwasservorräte zurück. Wie werden sich die Nitratgehalte weiterentwickeln? Wie würde sich eine Umstellung der Landwirtschaft auswirken? Wie rasch würde das System reagieren? Ähnliche Fragen stellen sich für den gesamten chemischen Fußabdruck, den der Mensch hinterlässt. Wie paust sich dieser in das Grundwasser und damit in das Trinkwasser durch? Wie lange werden unsere Nachfahren damit zu kämpfen haben? Ich kann Ihnen versichern, dass viele vom Menschen in die Umwelt entlassene Stoffe dort über viele Generationen nachweisbar bleiben!

Und mit den vielen gesammelten Daten füttern Sie Ihre Modelle ...
Genau. Solche über einen langen Zeitraum ermittelten hoch aufgelösten Daten sind die Voraussetzung für Modelle, die uns in die Lage versetzen, Zukunftsszenarien für die Wasserqualität zu entwickeln. In einem iterativen Prozess entstehen erstmalig Modelle, die ganze Wassereinzugsgebiete im Blick haben. Derzeit arbeiten wir noch mit verschiedenen Modellhierarchien und konzentrieren uns auf einzelne Fragestellungen. Denn die verfügbaren Modelle sind einfach noch nicht in der Lage, sämtliche Stoffreaktionen auf großen Skalen zu rechnen. Doch die Rechentechnik entwickelt sich rasant und damit auch unsere Möglichkeiten.

Das Interview führte Susanne Hufe



Die drei Bilder zeigen einen Ausschnitt der Dürreentwicklung in Deutschland Anfang der 1970er Jahre. Immer mehr Landesteile litten mit einem Bodenfeuchte-Index (SMI) ≤ 0,2 unter extremer Trockenheit.

DEN DÜRREN AUF DER SPUR

Vielen Meteorologen ist der April des Jahres 2007 noch in besonderer Erinnerung. Denn der Monat ging als Rekordmonat in die Geschichte der Wettermessung ein, weil es in Deutschland seit Aufzeichnung der Wetterdaten noch nie derart warm, trocken und sonnenreich war. Was viele Badegäste erfreute, war für Landwirte ein wirtschaftliches Desaster: Viele Jungpflanzen verdorrten, weil die Felder austrockneten. Bislang haben sich in Deutschland nur wenige Wissenschaftler diesen Dürren ausführlicher gewidmet. Einer von ihnen ist Dr. Luis Samaniego. Der Hydrologe hat am UFZ untersucht, wie viele Dürreperioden es in Deutschland seit 1950 gegeben hat und wie stark diese Trockenheiten ausgefallen sind. Das Ergebnis: In Deutschland gab es seit diesem Zeitpunkt rund 2180 Dürren in unterschiedlicher Ausbreitung und Intensität. Die längste Dürre dauerte fast drei Jahre, von August 1971 bis Juli 1974. Nahezu die Hälfte der Fläche Deutschlands war davon betroffen. Den Spitzenwert stellte eine Trockenperiode zwischen März 1959 und September 1960 auf, als zwei Drittel des Landes unter einer Dürre litten.

Entscheidend für das Auftreten einer sogenannten landwirtschaftlichen Dürre ist die Bodenfeuchte. Sie bezeichnet das Wasser, das in der Wurzelzone des Bodens durch hygroskopische und kapillare Kräfte entgegen der Schwerkraft festgehalten wird. Je nach Bodentyp und Morphologie befindet sich diese Zone zwischen 40 Zentimeter und zwei Meter unter der Erde. „Bodenfeuchte wirkt wie ein Schalter, der für die Integration von Wasser und Energie in das System von Boden, Vegetation und Atmosphäre verantwortlich ist“, sagt Samaniego.

Auf der einen Seite kontrolliert Bodenfeuchte den Anteil des Niederschlags, der durchsickert, abfließt oder verdunstet. Auf der anderen Seite verfügt sie über eine Art Gedächtnis, da die Bodenfeuchte Niederschlag, Verdunstung und Transpiration über Tage und Wochen speichert und darüber hinaus für die Vegetation lebensnotwendig ist. Ist der Tonanteil und damit die Anzahl der Wasser speichernden Tonminerale im Boden hoch, bleibt die Erde länger feucht. Im Unterschied dazu lassen sandige Böden Wasser stärker durchsickern und trocknen so leichter aus. Wie hoch die Bodenfeuchte ist, hängt aber vor allem von Niederschlag und Temperatur ab. „Die Wetterlagen sind für die Dürren verantwortlich“, folgert Samaniego.

Regional fallen die Dürren in Deutschland sehr unterschiedlich aus. Besonders lange hielten sich die Trockenheiten in den vergangenen 60 Jahren in Sachsen und Sachsen-Anhalt, stellte der UFZ-Forscher anhand eines von ihm entwickelten Bodenfeuchte-Index fest. Warum gerade diese beiden Bundesländer oft zu leiden hatten, ist wissenschaftlich noch nicht vollständig erschlossen. Als mögliche Gründe dafür macht Samaniego unter anderem morphologische Besonderheiten wie die Zusammensetzung der Böden sowie die ungünstige geografische Lage in der niederschlagsarmen Windschattenseite des Harzes aus. Im Unterschied dazu erwies sich Baden-Württemberg unter allen Bundesländern am wenigsten anfällig für Dürren. Zurückzuführen ist das nach Meinung von Samaniego am ehesten auf überdurchschnittlich hohe Niederschläge im von vielen Gebirgen geprägten Süden Deutschlands.

Doch der Blick zurück in die Vergangenheit ist nur ein Ziel des Forschungsprojekts, dem sich der 45-jährige UFZ-Forscher seit 2006 mit seiner Arbeitsgruppe widmet. Sie wollen mit ihrem Modell auch präzise vorhersagen können, welche Regionen in Deutschland künftig unter bestimmten Voraussetzungen verstärkt mit extremen Trockenheiten rechnen müssen. „Die Vermutung liegt nah, dass wir wegen des Klimawandels nicht nur mehr, sondern auch längere und härtere Dürren erleben“, sagt Samaniego. Um das herauszufinden, will er als Input Simulationen eines Klimamodells nutzen, an dem momentan Forscher des Karlsruher Institute of Technology arbeiten.

Profitieren können von Samaniegos Untersuchungen vor allem Landwirte. Sie können so besser einschätzen, ob ihre Agrarflächen in dürregefährdeten Gebieten liegen und ob sie künftig womöglich besser auf künstliche Bewässerungsanlagen setzen sollten, um Ernteausfälle zu verhindern. Der UFZ-Hydrologe sieht sich mit seiner Forschung aber erst am Anfang. Vieles sei noch ungelöst, sagt er. Was sind Ursachen von Dürren? Ist das Auftreten von Dürren an die Verteilung von Hoch- und Tief-Druck-Gebieten gekoppelt? Nur zwei von vielen Fragen, auf die Samaniego baldmöglichst Antworten finden möchte. *Benjamin Haerdle*

UFZ-Ansprechpartner:

Dr. Luis E. Samaniego-Eguiguren
Dept. Hydrosystemmodellierung

e-mail: **luis.samaniego@ufz.de**

mehr Informationen:
www.ufz.de/index.php?en=1397

DREIDIMENSIONALER BLICK IN DEN UNTERGRUND

Die Arabische Halbinsel gleicht beim Blick aus der Vogelperspektive größtenteils einer rötlich-braunen Einöde, anders auf der sechs mal drei Meter großen Leinwand im Visualisierungszentrum (Vislab) des UFZ in Leipzig. Wenn die Arbeitsgruppe um Prof. Dr. Olaf Kolditz die Rechner anwirft, schillert die saudi-arabische Halbwüste bunt. Dann tauchen die geologischen Schichten in verschiedenste Farben, stapeln sich 2000 mehrfarbige Türme als Bohrlöcher in der Wüste, durchziehen rote Linien als Grundwasserströmungen den Untergrund. Und wenn Kolditz bei einer Simulation sämtliche Brunnen auf der Halbinsel außer Betrieb nimmt, dann hebt sich der Grundwasserspiegel und die Farbe wechselt von einem satten Rot in ein Grün als Zeichen für einen ansteigenden Grundwasserstand.

Das von 13 Computern und 13 Beamern gesteuerte Vislab soll komplexe Modellierungen realitätsnah und anschaulich in 3D-Auflösung aufbereiten. Damit erleichtert es vielen Forschern die Arbeit. „Für uns ist es ein wichtiges Werkzeug, denn wir erhalten durch die 3D-Darstellung im wirklichen Sinne immer wieder neue Einsichten in komplexe Umweltsysteme“, so Umweltinformatiker Kolditz. Gefördert wird zudem die interdisziplinäre Kooperation: Wenn sich Forschergruppen unterschiedlicher Fachdisziplinen zusammentun, ist es von Vorteil, Forschungsergebnisse aufbereitet zu diskutieren und auf Konsistenz zu prüfen. Ein positiver Nebeneffekt: Das Vislab vereinfacht die Kommunikation mit der Öffentlichkeit. UFZ-Forscher können auch Politikern, Journalisten oder Schulklassen im Vislab komplexe Einsichten in ihre Forschungsthemen verständlich vermitteln.

In Deutschland ist das Vislab für Umweltforschung in dieser Form einzigartig. Genutzt wird es am UFZ für die Forschung zur Stadtentwicklung, die Visualisierung von Landschaften etwa bei der Planung von Windparkanlagen oder der geotechnischen Frage, wie Kohlendioxid am besten im Boden gespeichert wird. Der Schwerpunkt liegt aber in der Wasserforschung. Das zeigt nicht nur das Beispiel der Grundwassermodellierung in Saudi-Arabien, sondern auch ein Auftrag der Pekinger Wasserwerke. Für sie soll das Team um Kolditz ein Prognosemodell entwickeln, wie sich der Nitratgehalt im Grundwasser verringert, wenn durch eine Umstellung der landwirtschaftlichen Praxis weniger Nitrat in den Boden gelangt. „In diesen virtuellen Welten können wir die unterschiedlichsten Szenarien im Ergebnis zahlreicher Modellrechnungen optisch sehr gut zeigen“, sagt Kolditz.

Aber das Vislab stellt noch mehr als ein 3D-Kino für die Forschung dar. Es ist eine große Datenbank. Denn an die einzelnen visuellen Elemente sind immer Informationen gekoppelt. So lassen sich in der integrierten Modellierung unzählige Varianten und künftige Entwicklungen in realen Systemen durchspielen und gut abbilden.

Aufwändig ist bei der integrierten Modellierung nicht mehr das Programmieren. Vor höhere Hürden stellt das Forscherteam vielmehr die Fülle der Daten, welche mit modernen Erkundungsmethoden erhoben werden können. Ob die Daten die richtigen für die gewünschte Modellstudie und wie zuverlässig sie sind, sind zwei der wichtigsten Fragen, die sich die Wissenschaftler um Kolditz immer wieder stellen müssen. Damit sie die virtuellen Welten konsistent, effizient und auch an den zunehmenden Erkenntnisgewinn angepasst analysieren können, koppeln sie unterschiedliche Modellierungsprogramme. Dazu haben sie eine komplexe numerische Modellierungsplattform geschaffen (OpenGeoSys), die vielfältige Prozessbetrachtungen für unterschiedliche Anwendungsbereiche erlaubt.

Um die Vorzüge von Computerprogrammen wie OpenGeoSys zu stärken, suchen die UFZ-Forscher nach Methoden, die die Brauchbarkeit der Modellansätze und die Genauigkeit der Simulationen testen. Kolditz und seine Mitarbeiter haben deshalb in Zusammenarbeit mit unterschiedlichen Forschungseinrichtungen mehr als 100 Testbeispiele in einem Benchmark-Buch zusammengefasst. Sie wollen damit einen Qualitätsstandard schaffen, um die Präzision komplexer Berechnungsverfahren zu überprüfen. Je mehr Komplexität in den einzelnen Computerprogrammen stecke, umso anfälliger seien diese für unzweckmäßige Modellannahmen. Eine hundertprozentig genaue Darstellung der Realität gibt es nach Kolditz’ Meinung nicht: „Modelle sind immer vereinfachte Abbildungen der Realität, doch sie sind die einzige Möglichkeit, um in die Zukunft schauen zu können.“

Benjamin Haerdle

UFZ-Ansprechpartner:

Prof. Dr. Olaf Kolditz
Leiter Dept. Umweltinformatik

e-mail: **olaf.kolditz@ufz.de**

mehr Informationen: **www.ufz.de/index.php?en=17257; www.ufz.de/data/benchmarks10817.pdf**

V.l.n.r.: Dr. Fred Walkow, Markus Gloger, Gunter Daum, die Praxispartner des UFZ aus Bitterfeld (Foto: Michael Uhlmann).

SARISK MACHT HOCHWASSER BERECHENBAR

Nach dem Jahrtausendhochwasser von 2002 untersuchte eine Gruppe von UFZ-Wissenschaftlern im Auftrag des BMBF überschwemmte Bereiche im Mulde- und Elbegebiet im Hinblick auf ihre Schadstoffbelastung. „Vor uns lagen riesige Flächen, auf denen wir nach bestem Wissen und Gewissen Bodenproben entnahmen. Aber wir waren unsicher, ob wir das an den richtigen Stellen taten“, so beschreibt Dr. Wolf von Tümpling, einer der beteiligten Wissenschaftler, die damalige Situation. Daraufhin suchten er und seine Kollegen nach vorhandenen Möglichkeiten, die eine gezieltere Probennahme zur Beschreibung der Schadstoffbelastung nach einem Hochwasser ermöglichen. Doch Fehlanzeige. Sie fanden zwar Computermodelle zu einzelnen spezifischen Fragestellungen, wie etwa Schadstoffdynamik oder Hydraulik, an einer sinnvollen Verknüpfung der Modelle und der Daten fehlte es jedoch. Und so wurde die Idee geboren, diese Lücke zu schließen. Mit Unterstützung des BMBF begannen die Wissenschaftler 2005 mit der Arbeit am Entscheidungshilfesystem SARISK, das nicht nur Auskünfte über Schadstoffbelastungen nach einem Hochwasser erleichtern, sondern auch bessere Vorhersagen dazu erlauben sollte, wo das Wasser im Verlauf einer Überflutung wie hoch stehen könnte.

Als Fallbeispiel diente den Wissenschaftlern der Landkreis Bitterfeld. Dieser erwies sich als idealer Partner. Nicht nur, weil dort 100 Jahre Bergbau und Industrie ihre Spuren hinterlassen hatten, sondern auch, weil den Forschern dort viele Daten aus der Vergangenheit zugänglich gemacht wurden. Die wissenschaftlichen Arbeiten – dazu gehörten beispielsweise die Erstellung eines Höhenmodells und die Modellierung der Schadstoffausbreitung – erledigten v. Tümpling und seine Kollegen im Team mit Forschern der Universitäten Halle und Osnabrück. Am Dresdner Institut für Ökologische Raumentwicklung schuf man die Benutzeroberfläche des Programms. Und nach dreieinhalb Jahren Arbeit, Anfang 2009, war das Prognosemodell fertig.

Markus Gloger von der Unteren Umweltbehörde in Bitterfeld kennt das Programm inzwischen aus dem Effeff. Denn er arbeitet damit. „Alles war erst einmal Theorie. Der Härtetest kam mit dem Hochwasser im Januar 2011. Als sich abzeichnete, dass die Flut den Landkreis passieren würde, haben wir uns mit den Wasserwehren im Landkreisamt getroffen. Wir haben den aktuellen Pegel eingegeben, und SARISK sagte uns, dass wir in ein bis zwei Stunden mit dem Hochwasserscheitel zu rechnen hatten. Und wo das Wasser wie hoch stehen würde. Also haben wir die Betroffenen informiert und aufgefordert, ihre Autos wegzufahren.“ Auf zehn bis fünfzehn Zentimeter genau sagte das Modell die Wasserstände vorher. Das half, Kräfte und Material gezielt einzusetzen. In Bitterfeld weiß man jetzt genau, welche Bereiche überflutet werden und welche nicht. „Damit lassen sich unnötige Evakuierungen vermeiden“, freut sich Fred Walkow, Dezernent für Bau und Umwelt im Landkreis. „Denn dabei geht es immer ans Eingemachte. Es gibt Leute, die sich widersetzen. Es geht um Seniorenheime und Krankenhäuser. Je sicherer ich mit meiner Entscheidung bin, desto besser.“ Doch die Möglichkeiten der Vorsorge durch SARISK sind noch weitreichender, beispielsweise wenn es darum geht, nicht in überflutungsgefährdeten Gebieten zu investieren. Der Bitterfelder Umweltamtsleiter Gunter Daum stellt dazu eine weitere Rechnung auf: „Beim Hochwasser 2002 betrug der größte Einzelschaden 30 Millionen Euro. Das war unser neu errichtetes Krankenhaus, das überflutet wurde. Ungefähr dieselbe Summe wurde damals an Hilfen für Hausbesitzer ausgereicht. Die Kosten für die Entwicklung des Modells sind nur ein Bruchteil davon.“

Der Landkreis Anhalt-Bitterfeld will das System, mit dem sich auf jedes einzelne Haus zoomen lässt, auf die hochwassergefährdeten Gebiete an der Saale erweitern. „Regionen, die nicht eingedeicht sind, können davon profitieren. Für sie lohnt sich die Investition auf jeden Fall.“ Die konkreten Kosten hängen von den Ausgangsdaten ab. Je besser und umfangreicher sie sind, desto preiswerter wird die Modellierung. Und natürlich erfüllt SARISK auch den Zweck, für den es ursprünglich gedacht war: „Im Nachgang eines Hochwassers weiß man jetzt, wo Schadstoffe sein können“, versichert Wissenschaftler v. Tümpling.

(Quelle: Annette Schneider Solis/Sachsen-Anhalt-Magazin 1/11)

UFZ-Ansprechpartner:

Dr. Wolf von Tümpling
Dept. Fließgewässerökologie
e-mail: **wolf.vontuempling@ufz.de**

Wasser findet sich überall in unserer Umwelt: in der Atmosphäre, im Ozean, in Flüssen und Seen, im Grundwasser, im Boden, in Pflanzen und Organismen. In einem natürlichen Kreislauf wird Wasser zwischen den einzelnen Umweltkompartimenten bewegt und umverteilt. Es transportiert dabei Stoffe und Energie.

In urbanen Regionen spielt Wasser eine wichtige Rolle als Trink- und Brauchwasser. Urbanes Wasser schließt alle natürlichen Wasserflüsse und -kompartimente wie Regenwasser, Grundwasser, Fließgewässer und Standgewässer ein. Hinzu kommen die technischen Systeme für die Wasserver- und Abwasserentsorgung. Die moderne Wasserforschung muss deshalb qualitative, quantitative und technische Aspekte der Trinkwasserver- und Abwasserentsorgung integriert betrachten – unter Einbeziehung der Landnutzung im Stadtumland, des demografischen Wandels und der klimatischen Veränderungen.

Urbane Regionen

Kläranlagen

Mehr als 95 Prozent der Bevölkerung Deutschlands sind an die öffentliche Kanalisation (das Kanalnetz hat eine Länge von 515.000 km) angeschlossen. In etwa 10.000 Kläranlagen wird kommunales, gewerbliches und teilweise auch industrielles Abwasser in drei Reinigungsstufen mechanisch, biologisch und chemisch gereinigt, ehe es in Vorfluter (Flüsse) eingeleitet werden darf.
Mit Blick auf eine flexiblere Anpassung an Demografie und Schadstoffspektrum – auch in den Megacities der Entwicklungsländer – werden semizentrale Anlagen zukünftig eine größere Rolle als bislang spielen, ebenso die Wertstoffrückgewinnung der im Abwasser enthaltenen Stoffe wie Phosphor.

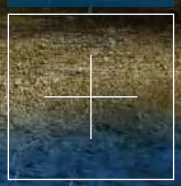
Gewässerausbau

Rund 23 Prozent des weltweit genutzten Wassers benötigt die Industrie. Die Werte schwanken aber – wie auch in der Agrarwirtschaft – sehr stark von Land zu Land (in Europa sind es etwa 50 Prozent). Besondere Probleme bereiten Chemikalien, die über viele Jahrzehnte die Qualität von Grund- und Oberflächenwasser oft großflächig beeinträchtigt haben. Für solche Megasites sind Managementstrategien gefragt, die sowohl innovative Monitoring-, Erkundungs- und Sanierungstechnologien als auch sozioökonomische und rechtliche Rahmenbedingungen beinhalten.

Industrie

Die ökologische Qualität eines Gewässers wird nicht nur durch die Wasserqualität, sondern auch durch seine Gewässerstruktur und die darin lebenden Organismen bestimmt. Schifffahrt, Wasserkraftnutzung oder Hochwasserschutz verändern aufgrund technischer Maßnahmen die Gewässerbeschaffenheit, die natürliche Vielfalt der Lebensräume und die Dynamik der Wasserführung. Die Durchgängigkeit von Fließgewässern wird durch Wehre und Staustufen unterbrochen, Auenfunktionen werden beeinträchtigt. Entscheidungen für oder gegen Flussausbaumaßnahmen müssen ökologische, ökonomische und umweltjuristische Aspekte berücksichtigen.

Übergangszone Grundwasser-Oberflächenwasser



Die Landwirtschaft benötigt weltweit etwa 60 Prozent des Frischwassers (in Europa etwa 44 Prozent, in wasserarmen Regionen wie dem Nahen Osten bis 80 Prozent). Sie beeinflusst durch diffus eingetragene Pestizidrückstände, durch Nährstoffe aus Düngemitteln oder Sedimente aus Bodenerosion die chemische Zusammensetzung sowie die Menge des Grund- und Oberflächenwassers.

Mit dem steigenden globalen Energiebedarf wird in den kommenden Jahren auch die Nachfrage nach Bioenergie und damit Biomasse wachsen. Damit entstehen neue Konfliktfelder, z. B. beim Artenschutz oder in der Wasserwirtschaft, denn für mehr Biomasse werden auch mehr Flächen, mehr Pestizide, mehr Düngemittel und mehr Wasser benötigt.

Landwirtschaft und Bioenergie

Talsperren

Talsperren dienen als Absperrbauwerke, Stauraum, Entnahmebauwerke oder Hochwasserentlastungsanlagen. Sie sind aber auch mit erheblichen Veränderungen und Beeinträchtigungen von Natur und Landschaft verbunden, denn das natürliche Fließgewässerregime wird umgestaltet.
Ihre Funktion als Trinkwasserreservoir wird seit einigen Jahren durch einen Anstieg des Gehaltes an gelöstem organischen Kohlenstoff im Wasser beeinträchtigt. Ob die Stoffflüsse geologischer Natur sind oder durch Landnutzungs- und Klimawandel hervorgerufen werden, ist Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen.

In Wasserschutzgebieten (WSG) sollen oberirdische Gewässer und Grundwasser mit Ge- und Verboten vor schädlichen Einflüssen geschützt werden. Es wird Grundwasser angereichert, das Abfließen von Niederschlagswasser sowie das Abschwemmen oder Eintragen von Bodenbestandteilen und Düngemitteln in Gewässer verhindert. Je nach Schutzzone (I, II oder III) gelten Nutzungsbeschränkungen, z. B. bei Bebauung, landwirtschaftlicher Nutzung, Straßenbau, Anwendung von Gülle oder Klärschlamm, Ablagerung von Abfallstoffen oder Massentierhaltung.

Wasserschutzgebiete

Das Trinkwasser einiger großer Ballungsräume wird zu großen Anteilen aus Uferfiltrat gewonnen. Außerdem schreibt die EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) explizit eine integrale Betrachtung von Grund- und Oberflächenwasserressourcen vor. Deshalb ist das wissenschaftliche Interesse, die hydraulischen und biogeochemischen Bedingungen der Übergangszone und die Interaktionen zwischen Grund- und Oberflächenwasser integriert zu untersuchen, stark gewachsen. Zudem werden neue Methoden zur Quantifizierung und Simulation der Austauschprozesse entwickelt.

(Grafik: CAST Dresden)

Technische Überwachung der SAFIRA-Pilotanlage in Zeitz. Auf dem Gelände eines ehemaligen Hydrierwerkes untersuchen UFZ-Wissenschaftler den mikrobiologischen Abbau von Benzol im Grundwasser.

TEUREN ALTLASTEN INNOVATIV BEGEGNEN

Nach Schätzungen des Umweltbundesamtes gibt es allein in Deutschland heute rund 300.000 altlastverdächtige Flächen, darunter auch einige, die sich über mehrere Hektar bis Quadratkilometer erstrecken und deshalb Megasites genannt werden. In Europa sollen es Tausende sein. Das Spektrum der Altlastenflächen reicht von ehemaligen Müllkippen, Industrieabfalldeponien und chemischen Reinigungen über stillgelegte Erzbergwerke bis hin zu militärisch genutzten Flächen, ehemaligen Standorten der Chemieindustrie und der Erdölverarbeitung. Nach Leckagen und Unfällen sickerten meist über lange Zeiträume große Mengen der unterschiedlichsten Schadstoffe in den Untergrund. Gehen von ihnen Gefahren für das Ökosystem oder die menschliche Gesundheit aus, müssen die Flächen saniert werden. „Sanierung“ bedeutet dabei in den meisten Fällen weniger die Wiederherstellung eines naturnahen, gesunden Zustandes als in erster Linie eine möglichst weitgehende Entfernung des Hauptschadstoffes.

Wie teuer eine solche Sanierung sein kann, lässt sich am Beispiel eines typischen Schadstoffes aus dem industrienahen Bereich verdeutlichen: Ein Kilogramm des chlorierten Kohlenwasserstoffs Perchlorethylen herzustellen, kostet einen Euro. Hingegen müssen für die Entfernung von einem Kilogramm des potenziell krebserregenden Stoffes aus dem Grundwasser gut und gerne tausend Euro oder mehr investiert werden. Das mag bei kleinen Schadensfällen noch technisch machbar und bezahlbar sein. Bei den riesigen Flächen der Megasites mit komplexen Schadstoffspektren und vielfältigen Schadstoffquellen ist es meist unmöglich, die Standorte vollständig zu erkunden und alle Schadstoffe zu erfassen, geschweige denn, sie komplett aus den Böden und dem Grundwasser zu entfernen. Überlässt man sie dagegen unkontrolliert sich selbst, können sie sich weiter ausbreiten und in Flussauen, Oberflächengewässer oder gar unterkellerte Gebäude gelangen.

Um diese Gefahren für Mensch und Umwelt abzuwehren und eine sinnvolle Nachnutzung von Altlastenflächen voranzutreiben – auch im Sinne eines nachhaltigen Umgangs mit der Ressource Fläche –, entwickeln Wissenschaftler des UFZ kostengünstige und innovative Sanierungskonzepte und Managementstrategien. Im Rahmen des Forschungsprojektes SAFIRA II wurde an geeigneten Modellstandorten in Deutschland eine Infrastruktur aus Mess-, Erkundungs-, Monitoring- und Sanierungstechnik aufgebaut, um den Transport, den natürlichen Abbau, An- und Einlagerungen von Schadstoffen an Bodenbestandteile oder Verdünnungseffekte zu studieren.

Mikroorganismen als Sanierer

Dabei hat sich immer wieder gezeigt, dass in der gezielten Nutzung von Mikroorganismen ein hohes Potenzial steckt, um Umweltschadstoffe erfolgreich und preiswert zu beseitigen. Sie kann eine echte Alternative zu herkömmlichen Verfahren wie den sogenannten Pump-and-treat-Maßnahmen sein, auf denen immer noch der überwiegende Teil der Altlastensanierung in Deutschland beruht. „Pump and treat“ heißt: Das schadstoffbelastete Grundwasser wird aus dem Untergrund nach oben gepumpt und in technischen Anlagen chemisch oder biologisch behandelt. Bei den riesigen Grundwassermengen und komplexen Chemikalien-cocktails kostet das viel Geld und kann viele Jahre dauern.

Der Schadstoffabbau durch im Untergrund natürlich vorkommende Mikroorganismen dagegen wäre eine energiesparende und naturnahe Sanierungsmethode – wenn nachgewiesen werden kann, dass diese Abbauprozesse *in situ* stabil ablaufen und keine Schutzgüter wie Trinkwasserbrunnen oder Flüsse gefährdet sind. Wissenschaftler des UFZ testen diesen Forschungsansatz in zwei Pilotanlagen auf dem Gelände des ehemaligen Hydrierwerkes in Zeitz. Dort wurde bis 1991 in direkter Nachbarschaft eine Benzolanlage betrieben. „Wir haben die Benzolfahne im Untergrund und die dort ablaufenden Selbstreinigungsprozesse genauestens erkundet. Inzwischen wissen wir relativ sicher, dass die Benzolfahne durch den stetigen mikrobiologischen Benzolabbau stationär werden könnte, das giftige Benzol sich also nicht weiter ausbreitet und daher nicht unbedingt aktiver Sanierungsbedarf besteht. Man könnte also den natürlichen Abbauvorgängen ihren Lauf lassen“, erklärt Grundwasserexperte Prof. Holger Weiß und ergänzt: „Diese gehen allerdings langsam vor sich. Wenn die Flächen für potenzielle Investoren schneller nutzbar gemacht werden sollen, müssen die natürlichen Abbauprozesse beschleunigt werden.“ Deshalb testen die Forscher in der Pilotanlage durch die Zugabe unterschiedlicher Nährstoffe, ob sich der Schadstoffabbau im Grundwasser auf diese Weise beschleunigen lässt und welche Nährstoffe am besten geeignet sind.

Auch am Standort Leuna setzen die Wissenschaftler darauf, dass Mikroorganismen

mit der schwierigen Kost fertig werden. Hier wurde bis 1996 eine der größten Raffinierien der ehemaligen DDR betrieben. Durch Kriegsschäden, Havarien und Handhabungsverluste wurden Mineralölkohlenwasserstoffe, sogenannte BTEX-Aromaten (Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylole) sowie Benzinzusatzstoffe über viele Jahrzehnte ins Grundwasser eingetragen. In der Pilotanlage des Projektes „Compartment Transfer" testen Grundwasserforscher, Chemiker und Biologen des UFZ seit 2007 fünf naturnahe Sanierungsverfahren. Allen gemeinsam ist, dass das kontaminierte, sauerstofffreie Grundwasser kontrolliert in oberflächennahe, sauerstoffreiche Systeme wie Oberflächengewässer, Wurzelzonen von Pflanzen oder belüftete Bodenzonen überführt wird. Dort bieten sich den Mikroorganismen dank Sauerstoff, Pflanzenwurzeln und Bodenpartikeln beste Lebensbedingungen, um die Schadstoffe abzubauen. Am besten funktionieren der Schadstoff-Transfer in ein offenes Grabensystem und das Vertikalfilterverfahren. Bei der Filterung durch eine Grabenanlage muss das Grundwasser nicht gehoben werden, sondern verbleibt im künstlich errichteten Graben und durchströmt diesen langsam. Der Graben wird mit Stroh gefüllt und mit Luft begast, was den mikrobiellen Schadstoffabbau deutlich beschleunigt. Beim Vertikalfilterverfahren wird kontaminiertes Wasser durch bepflanzte Feuchtbecken (Wetlands) geleitet, in denen der mikrobielle Abbau an den Grenzflächen der Pflanzenwurzeln und Bodenpartikel erfolgt, denn dort fühlen sich die Mikroorganismen nicht nur am wohlsten, sondern können auch stabile und sehr effektive Biofilme ausbilden. Dieses Verfahren wird gerade in Zusammenarbeit mit einem Sanierungsunternehmen in den Realmaßstab überführt.

Ein Bypass zur Grundwasserreinigung

Dem komplexen und gefährlichen Schadstoff-Cocktail im Bitterfelder Grundwasser ist allein mit Mikroorganismen nicht beizukommen. „Die Hauptschadstoffe, mit denen wir es in Bitterfeld zu tun haben, sind chlorierte Kohlenwasserstoffe.", erklärt Holger Weiß. Er hält ein Fläschchen in der Hand, dem ein stechend-beißender Geruch entströmt – eine Grundwasserprobe aus Bitterfeld, dem einstigen Symbol für Umweltverschmutzung und marode Wirtschaft. Sie entstammt dem hundert Millionen Kubikmeter großen Grundwasserkörper, der sich unter dem Areal des Ökologischen Großprojekts Bitterfeld-Wolfen befindet. Denn auch wenn die Region dank attraktiver Seenlandschaft und moderner Chemieindustrie inzwischen wieder lebenswert ist, schlummern im Untergrund jede Menge Altlasten. Ohne gezielte Abpumpmaßnahmen in besonders gefährdeten Bereichen würde das belastete Grundwasser in die Keller von Wohnhäusern eindringen und die Gesundheit der Bewohner gefährden.

Deshalb betreibt die BilfingerBerger Umweltsanierung GmbH auf dem Gelände der Megasite eine hoch technisierte Anlage zur Grundwasserreinigung. Über Brunnengalerien wird das Grundwasser gesammelt, durch Strippung (Ausblasen mit Luft) und Bindung der Schadstoffe an Aktivkohle gereinigt und über das Klärwerk am Standort in die Saale geleitet. Pro Stunde können so 200 Kubikmeter Wasser behandelt werden. Doch Teile der Anlage arbeiten nicht optimal, weil neben den chlorierten Kohlenwasserstoffen auch flüchtige Schwefelverbindungen mit dem Luftstrom ausgestrippt werden. Vor allem die eher selten anzutreffende Schwefelverbindung Schwefelkohlenstoff bereitet Schwierigkeiten. Bei der katalytischen Verbrennung der Schadstoffe im Luftstrom entsteht Schwefelsäure, die zu einer schnellen Korrosion von Reaktoren und Wärmetauschern führt.

Das UFZ hat von BilfingerBerger den Auftrag erhalten, dieses Problem zu lösen. In einer Art Bypass-Verfahren wird aus der großen Reinigungsanlage ein Teilstrom des Grundwassers abgezweigt und durch verschiedene Reaktorsysteme der Treatment-Train-Anlage (das sind aneinandergereihte flexible Container und Reaktoren) des UFZ geleitet. Dort sind unterschiedliche Verfahrensansätze installiert, die zuvor im Labormaßstab erprobt worden sind und fortlaufend optimiert werden. Gemeinsam mit Kollegen der TU Darmstadt haben die UFZ-Forscher nun ein innovatives und kostengünstiges Verfahren entwickelt, das auf der Hydrolyse von Schwefelkohlenstoff an basischem Aluminiumoxid beruht. Damit können sämtliche Schwefelverbindungen unter moderaten Bedingungen vollständig und selektiv entfernt werden, ohne dabei die chlorierten Kohlenwasserstoffe umzusetzen, denn dabei würde störende Salzsäure entstehen. Das Verfahren wurde zum Patent angemeldet und hat inzwischen zahlreiche Betriebsperioden im Pilotmaßstab absolviert. Als nächster Schritt folgt eine sogenannte Leistungsfahrt. "Das heißt, wir müssen dem Auftraggeber demonstrieren, dass das Verfahren in unserer Pilotanlage funktioniert und den sehr anspruchsvollen Reinigungsanforderungen standhält. Wenn das der Fall ist, entscheidet der Betreiber, ob das UFZ-Verfahren in die Großanlage implementiert wird – oder nicht", erläutert der Chemiker Prof. Frank-Dieter Kopinke vom UFZ. „Wir wünschen uns natürlich, dass das Verfahren so attraktiv ist, dass der Industriepartner sagt: Das brauchen wir unbedingt – nicht nur in Bitterfeld." Da die Treatment-Train-Anlage flexibel zusammengesetzt ist, kann sie nach Abschluss des Projektes in Bitterfeld auch auf anderen kontaminierten Flächen zum Einsatz kommen.

Bettina Hennebach und Doris Böhme

UFZ-Ansprechpartner:

Prof. Dr. Holger Weiß
Leiter Dept. Grundwassersanierung
e-mail: **holger.weiss@ufz.de**

Prof. Dr. Frank-Dieter Kopinke
Leiter Dept. Techn. Umweltchemie
e-mail: **frank-dieter.kopinke@ufz.de**

mehr Informationen:
www.ufz.de/index.php?de=13244

In der Pilotanlage des UFZ-Projektes „Compartment Transfer" (CoTra) werden verschiedene naturnahe Sanierungsverfahren getestet, um sogenannte BTEX-Schadstoffe im Grundwasser abzubauen.

In der Pilot- und Demonstrationsanlage in Fuheis (Jordanien) werden mit unterschiedlichen Systemen dezentrale Technologien zur Abwasserreinigung getestet.

SMARTE LÖSUNGEN FÜR DIE ABWASSERNUTZUNG

Neue Konzepte einer dezentralen Wasserwirtschaft für den Nahen Osten werden im internationalen Forschungsprojekt SMART (**S**ubstainable **M**anagement of **A**vailable Water **R**esources with Innovative **T**echnologies) entwickelt. Wie dezentrale Abwasserreinigung und -wiederverwendung konkret funktionieren kann, werden die Bewohner eines jordanischen Dorfes bald mit wissenschaftlicher Begleitung ausprobieren.

Der Nahe Osten ist eine der wasserärmsten Regionen der Welt. Zusammen mit jordanischen, palästinensischen und israelischen Kollegen suchen die Helmholtz-Forscher nach Wegen, die Wasserversorgung in der Region zu stabilisieren. Ziel ist, die knappen Ressourcen bestmöglich zu nutzen und deshalb auch die Wiederverwertung von Abwasserströmen – mit Rücksicht auf religiöse Vorschriften – zu ermöglichen. „Das ist eine echte Herausforderung, die nur mithilfe lokaler Akteure und der Akzeptanz der Bevölkerung zu realisieren ist“, weiß Dr. Roland Müller, Projektleiter von SMART. Teil dieses 2007 gestarteten Projekts ist eine dezentrale Abwasserstrategie für Jordanien, die von Forschern des UFZ gemeinsam mit den lokalen Akteuren entwickelt und 2009 von der jordanischen Regierung beschlossen wurde. Erstes Ergebnis war im März 2010 die Inbetriebnahme des SMART-Forschungs- und Demonstrationsstandortes mit mehreren Pilotanlagen zur dezentralen Abwasserreinigung im jordanischen Fuheis bei Amman. Der Standort, der an die Technische Universität Al-Balqua übergeben wurde, war vom UFZ in Zusammenarbeit mit dem Bildungs- und Demonstrationszentrum für dezentrale Abwasserbehandlung e. V. (BDZ) in Leipzig konzipiert und entwickelt worden. Finanzielle Unterstützung leisten das BMBF sowie die beteiligten Unternehmen.

Die Erkenntnisse aus den Demonstrationsanlagen in Fuheis werden nun in einem nächsten Schritt auf reale Standorte in weiteren Dörfern übertragen: „Neun bis zwölf Anlagen sollen an den ausgewählten Standorten in Jordanien entstehen“, erklärt Müller. Die Größe der dezentralen Abwasseranlagen soll extrem variabel sein – von der Einzelhauslösung bis hin zu Systemen für ein kleines Dorf mit maximal 300 Einwohnern. Ziel ist es, Erfahrungen und konkrete Zahlen zu generieren, Erkenntnisse über Zuständigkeiten, Kosten und nötige Wartungsarbeiten zu gewinnen, um eine weitere Verbreitung dezentraler Technologien vorzubereiten. Dabei kommen ganz unterschiedliche technologische Systeme zum Einsatz: An die Standortbedingungen adaptierte bepflanzte Bodenfiltersysteme, Membran-Bioreaktoren oder Sequencing Batch Reaktoren. Müllers Mitarbeiter Dr. Manfred van Afferden lobt die konstruktive Zusammenarbeit: „Wir kommen gut voran, denn alle Akteure ziehen an einem Strang, auch eigentlich konkurrierende Firmen. Unsere Wortschöpfung dafür ist Coopetition – eine Mischung aus Cooperation und Competition.“

Die gerade begonnene dritte Phase des SMART-Projekts besteht darin, größere Einzugsgebiete zu betrachten und die Realisierung konkreter Projekte anzuschieben: „Wir haben auf der Basis unserer bisherigen Forschungsergebnisse eine Prioritätenliste erstellt und danach geeignete Regionen gemeinsam mit dem jordanischen Wasserministerium ausgewählt. In Zusammenarbeit mit dem BDZ sollen nun – unabhängig von der angewandten Technologie – Systemlösungen erarbeitet und angeboten werden“, betont Müller. Die Idee der UFZ-Forscher für Jordanien: Dezentrale Infrastrukturcluster, die aber zentral finanziert, betrieben und gewartet werden. Derzeit führen die beiden Leipziger gemeinsam mit anderen Projektbeteiligten Gespräche mit allen involvierten jordanischen Ministerien, lokalen und regionalen Entscheidungsträgern. „Die große Akzeptanz und das Vertrauen der Jordanier schaffen eine gute Basis für die nächsten Schritte“, betonen die Wissenschaftler. Vor ihnen liegt eine gewaltige Aufgabe, denn nach den politischen Entscheidungen geht es darum, die Bevölkerung zu informieren und zu sensibilisieren, Bedenken auszuräumen und Know-how zu vermitteln. Denn wichtig ist nicht nur die schonende Verwendung der vorhandenen Ressourcen, sondern vor allem auch die Teilhabe der Bevölkerung an einem verbesserten Wassermanagement. „Wenn die Leute verstanden haben, das wiedergenutztes Abwasser ihre Felder bewässern oder ihre Stadt begrünen kann, werden sie sich den neuen Technologien sicher nicht verschließen“, sind sich Müller und van Afferden einig. *Gundula Lasch*

UFZ-Ansprechpartner:

Dr. Roland Müller (Leiter),
Dr. Manfred van Afferden
Dept. Umwelt- und Biotechnologisches Zentrum

e-mail: **roland.mueller@ufz.de;**
manfred.afferden@ufz.de

mehr Informationen und Trailer (Video):
www.ufz.de/smart

Trinkwasser gibt es in den Jurtenvierteln am Stadtrand von Darkhan nur per Kanister. Die Mehrheit der Einwohner verfügt weder über einen Trinkwasser- noch über einen Abwasseranschluss. Mit knapp 80.000 Einwohnern ist Darkhan die drittgrößte Stadt der Mongolei und liegt im Einzugsgebiet des Flusses Kharaa, der schließlich in den Baikalsee fließt, den ältesten und tiefsten Süßwassersee der Erde.
Foto: Lena Horlemann/UFZ

NOMADENLEBEN ADÉ

Am Stadtrand von Darkhan prallen Tradition und Moderne aufeinander. Hier haben sich viele mongolische Familien angesiedelt, die früher als Nomaden über die Weiden zogen. Ihre Behausung ist dabei seit Jahrhunderten die gleiche: Mit Filzzelten bzw. Jurten siedeln sie auf freien Flächen, werden später vielleicht Grundstücksbesitzer und bauen einfache Holzhäuser. Was in dem dünn besiedelten Land viele Jahrhunderte lang funktioniert hat, wird jetzt durch die Konzentration auf kleinstem Raum zum Hygiene- und Umweltproblem. Kanalisation oder gar Kläranlagen gibt es in diesen Ger-Distrikt genannten Vierteln nicht. Trinkwasser muss von Kiosken geholt werden. Im Rahmen der Internationalen Wasserallianz Sachsen (IWAS, siehe S. 28) wurde der Ort nun erstmals von Wasserforschern sozialwissenschaftlich unter die Lupe genommen. Die UFZ-Wissenschaftlerin Dr. Katja Sigel, die eine Fallstudie zur partizipativen Wasserinfrastrukturplanung in den Ger-Distrikten koordiniert, befragte dazu zusammen mit einheimischen Helfern 139 Haushalte zur aktuellen Situation im Bereich Trinkwasser, Abwasser und Hygiene: „Die Leute verbrauchen im Mittel nur 12 Liter Wasser pro Person und Tag, was sehr wenig ist und die Frage aufwirft, ob sie damit ihren Mindestbedarf decken können. Viele haben eigene Brunnen auf dem Grundstück, um an zusätzliches, kostenloses Wasser zu gelangen. Dieses Wasser ist jedoch möglicherweise durch Fäkalien aus den nahestehenden, unabgedichteten Latrinen kontaminiert“, berichtet Sigel.

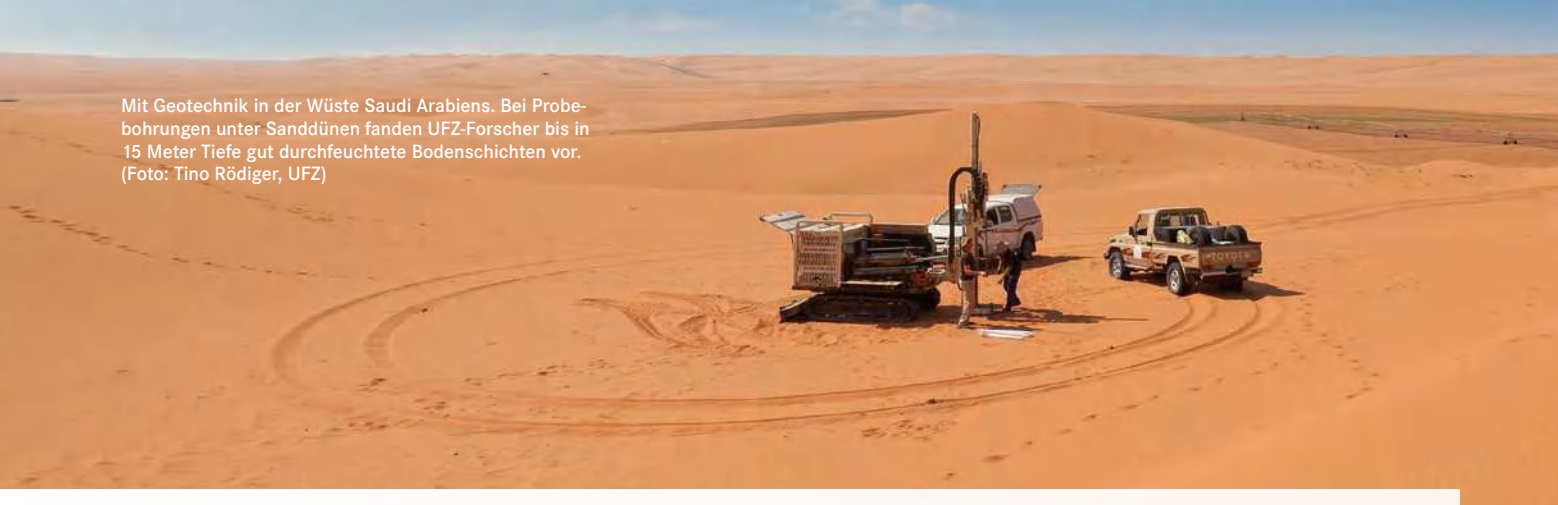
„Den Norden der Mongolei haben wir als Modellregion für Integriertes Wasserressourcenmanagement (IWRM) ausgewählt, weil die Flüsse in Zentralasien von Klima und Landnutzungswandel sowie der Ausbeutung von Bodenschätzen in den nächsten Jahrzehnten besonders stark betroffen sein werden – mit dramatischen Konsequenzen. Bestandsaufnahmen haben ergeben, dass die Anzahl der Bäche, Flüsse und Seen drastisch zurückgegangen sein soll und viele Quellen versiegen“, erläutert Projektleiter Prof. Dietrich Borchardt vom UFZ. Das rund 15.000 km^2 große zusammenhängende Flussgebiet bietet den Wissenschaftlern ideale Bedingungen, Veränderungen in einer hohen Dynamik zu beobachten. In der ersten Phase des Projektes ging es deshalb darum, die Ausgangssituation zu analysieren und Daten zu verifizieren. Dazu wurden Wasserbilanzen, Sediment- und Stoffeinträge sowie der ökologische Zustand erfasst und in Modelle übertragen. In der zweiten Phase stehen die praktische Umsetzung von Lösungsansätzen und das „Capacity Building“, also die Ausbildung von Studenten, Fortbildungen für Mitarbeiter in Ministerien, Behörden, der Wasseragentur oder für Betreiber von Infrastrukturen, im Vordergrund. Borchardt: „Die Probleme in vielen Regionen Zentralasiens ähneln sich: extremes kontinentales Klima, starkes Bevölkerungswachstum, nicht vorhandene oder marode Abwasseranlagen, zunehmender Wasserverbrauch und sinkende Wasserressourcen, die durch Überweidung, Bodenerosion und Rohstoffabbau bedroht sind. Dazu kommt, dass die Jahresmitteltemperatur hier um +0,7 Grad Celsius in den letzten 50 Jahren überdurchschnittlich stark angestiegen ist.“

Das Interesse an einem IWRM nach deutschem Vorbild ist bei den Behörden in der Mongolei groß. „Konzepte gibt es zwar auf dem Papier, aber noch ist unklar, wie diese in der Praxis umgesetzt werden könnten. Denn eine universelle Blaupause für die weltweit sehr unterschiedlichen Problemlagen im Wassersektor kann es nicht geben. Reformen sind daher immer auch mit Ausprobieren und Erfahrung verbunden“, schlussfolgern Lena Horlemann und Dr. Ines Dombrowsky, die im Auftrag des UFZ die institutionellen Rahmenbedingungen untersuchen, die sich seit der politischen Wende grundlegend verändert haben. Zentralistische Strukturen lösten sich auf, neue entstanden, teilweise bildete sich auch ein Machtvakuum. Trotz dieser Probleme ist die Mongolei beträchtliche Schritte gegangen: Ein neues Wassergesetz wurde eingeführt mit dem Ziel, ein effektives IWRM aufzubauen, und eine Nationale Wasseragentur wurde geschaffen. Probleme bereitet noch die Etablierung von Flussgebietsorganisationen, die zwischen den Interessen der lokalen Wassernutzer vermitteln sollen, aber zu wenige Rechte und finanzielle Mittel haben, um dies auch durchzusetzen. Zudem sind die Verantwortlichkeiten häufig unklar. Die mongolische Politik ist immer noch sehr zentral geprägt – ein Relikt aus Sowjetzeiten. Das macht es lokalen Verwaltungen oft schwer, Ressourcen zu generieren oder die Öffentlichkeit zu beteiligen. Die Erben Dschingis Khans haben also noch einen weiten Weg an Reformen vor sich, die nur dann erfolgreich sein werden, wenn der Spagat zwischen gestiegener Wassernachfrage und gesunkenem Wasserangebot gelingen wird.

Tilo Arnhold

UFZ-Ansprechpartner:

Prof. Dr. Dietrich Borchardt
Dept. Aquatische Ökosystemanalyse
e-mail: **dietrich.borchardt@ufz.de**
mehr Informationen:
www.iwrm-momo.de



Mit Geotechnik in der Wüste Saudi Arabiens. Bei Probebohrungen unter Sanddünen fanden UFZ-Forscher bis in 15 Meter Tiefe gut durchfeuchtete Bodenschichten vor. (Foto: Tino Rödiger, UFZ)

WASSERBILANZEN PRÄZISE ERMITTELN

Wasser ist ein höchst kostbares Gut. Das gilt besonders in sehr ariden Regionen der Welt wie in Saudi-Arabien, wo das wertvolle Nass als Trink- und Brauchwasser für die Landwirtschaft dringend benötigt wird. Weil es dort selten regnet, ist das Land stark von dem Wasser abhängig, das die Brunnen zu Tage fördern. Die Konsequenz: „Für aride Gebiete ist es entscheidend, genau zu wissen, wie viel Grundwasser vorhanden ist und wie viel jedes Jahr neu gebildet wird“, sagt Dr. Christian Siebert. Der Hydrogeologe vom UFZ erforscht seit neun Jahren Wasserbilanzen – nicht nur in Saudi-Arabien, sondern auch in anderen Gebieten im Mittleren Osten wie in Jordanien und Israel. Das von Siebert geleitete Saudi-Arabien-Projekt zählt zur Internationalen Wasserforschungsallianz Sachsen (IWAS). Ein Verbundprojekt, das vom Bundesforschungsministerium gefördert wird und in fünf hydrologisch sensiblen Gebieten der Erde Lösungen erarbeitet, wie man Wasservorräte nachhaltig managen kann (siehe S. 28).

Stellenweise weniger als 100 Millimeter fallen auf der Arabischen Halbinsel pro Quadratmeter im Jahr. Zum Vergleich: Selbst in sehr trockenen Gebieten in Deutschland wie dem Thüringer Becken regnet es sechsmal mehr. Deshalb mag es erstaunen, dass sich in so trockenen Regionen überhaupt Grundwasser bilden kann, zumal die meisten Niederschläge bei den hohen Tagestemperaturen von bis zu 60 Grad Celsius umgehend verdunsten sollten. Nur wenige Millimeter können ins Erdreich versickern. „Das hört sich sehr wenig an“, sagt Siebert, „bezogen auf eine Fläche von mehr als zwei Millionen Quadratkilometern kommt aber eine erstaunliche Menge zusammen“. Und weil auf dem Quadratmeter jeder Millimeter Niederschlag zählt, müssen die Wasserbilanzen präzise ermittelt werden. „Es kommt quasi auf die Zahl hinterm Komma an“, sagt Siebert.

Dass im Untergrund der Arabischen Halbinsel Grundwasserressourcen in dem Mega-Aquifer liegen, weiß die Forschung schon seit längerem. Dieser Grundwasserleiter erstreckt sich über die gesamte Halbinsel und ist stellenweise bis zu 2.000 Meter mächtig. Bekannt ist auch, dass die Grundwasservorräte drastisch sinken, weil die Brunnen sehr viel Wasser für die Landwirtschaft fördern. Unbekannt ist aber, ob sich in der Tiefe tatsächlich neues Grundwasser bildet. Dieses Rätsel wollen die UFZ-Wissenschaftler lösen. Ein diffiziles Unterfangen, denn in einer so feinen Auflösung hatten Forscher in Saudi-Arabien diesen Ansatz bislang nicht versucht.

Siebert und sein Team sind deshalb auf der Suche nach dem „Point of no return“. Das ist der Punkt im Boden, bei dem die nach einem Regenschauer in den Sandboden versickerte Feuchtigkeit nicht mehr verdunstet, sondern tiefer wandert und damit irgendwann zum Grundwasser stößt. Denn die hohen Temperaturen sorgen nicht nur dafür, dass das meiste Wasser rasch an der Oberfläche verdunstet, sondern auch, dass dem Boden Feuchtigkeit entzogen wird – unklar ist, bis in welche Tiefe.

Den „Point of no return“, dessen Existenz unter Wissenschaftlern freilich umstritten ist, versucht das Team in einem Freilandversuch zu ermitteln. Auf einer 200 Quadratmeter großen Versuchsfläche auf der Arabischen Halbinsel lassen die Forscher Areale mit Niederschlägen künstlich beregnen. So wollen sie herausfinden, wie sich die Bodenfeuchtigkeit in zunehmender Tiefe verändert, woraus dann der kritische Punkt abgeleitet werden soll. Wenn das gelingt, hoffen die Wissenschaftler in Abhängigkeit der Beschaffenheit des Bodens und der klimatischen Bedingungen sagen zu können, wie viel Grundwasser sich nach einer bestimmten Niederschlagsmenge neu bildet. Erste Indizien scheinen die Neubildung zu bestätigen: Bei Probebohrungen unter Sanddünen fanden die UFZ-Forscher bis in 15 Meter Tiefe gut durchfeuchtete Bodenschichten vor.

In zwei Jahren wollen die Hydrogeologen Ergebnisse vorlegen. Repräsentativ für ganz Saudi-Arabien werden sie nicht sein – dafür ist die Morphologie des Landes zu unterschiedlich – jedoch typisch für Sandmeere und damit wesentlich präziser als die empirischen Formeln, mit denen bisher gearbeitet wird. Damit können die Wissenschaftler den Wasserkreislauf in Saudi-Arabien in einem Computerprogramm modellieren. Helfen kann das lokalen Entscheidungsträgern. „So lässt sich simulieren, was mit Grundwasservorräten passiert, wenn die Brunnenfelder höhere Wassermengen für die Landwirtschaft fördern oder der geringe Niederschlag noch seltener wird“, sagt Siebert. Wasser könne und müsse intelligenter und nachhaltiger genutzt werden.

Benjamin Haerdle

UFZ-Ansprechpartner:

Dr. Christian Siebert
Dept. Catchment Hydrology

e-mail: **christian.siebert@ufz.de**

mehr Informationen:
www.iwas-sachsen.ufz.de

Saale-Elbe-Mündung bei Barby im Biosphärenreservat Mittlere Elbe. Entlang der Mittleren Elbe sind derzeit 15 Deichrückverlegungen mit einer Gesamtfläche von 2.600 Hektar geplant.

SO SCHNELL VERZEIHT DIE AUE NICHT

Es ist eine konfliktbeladene Nachbarschaft, die von Fluss und Mensch. Beide erheben Anspruch auf das Land an den Ufern. Der Fluss, weil er sich ausdehnen muss, wenn ihm große Wassermassen zufließen. Der Mensch, weil er will, dass dort sein Vieh weidet, seine Brücken und Häuser stehen oder seine Schiffe anlegen. Ein paar Jahrhunderte lang schien der Mensch die Oberhand zu gewinnen. Deiche zog er durch die Talniederungen und rang dem Fluss Streifen um Streifen Uferland ab. Die Elbe musste in ihrem Mittellauf rund 80 Prozent ihres ursprünglichen Überschwemmungsgebietes hergeben. Hinter den Deichen verkümmerte die Artenvielfalt, erlahmte die Auendynamik.

Dass der Fluss solch eine Einengung nicht „klaglos“ hinnehmen kann, bewies spätestens das Elbehochwasser 2002. Zu jenen, denen nicht erst diese Katastrophe die Augen öffnete, gehörten Wissenschaftler des UFZ. Schon Ende der 1990er Jahre waren sie eingebunden in das Projekt RIVA. Zoologen, Botaniker, Hydrologen, Bodenkundler und Statistiker suchten gemeinsam nach einem Indikationssystem, mit dessen Hilfe auf den ökologischen Zustand einer Aue geschlossen werden kann. Und sie fanden tatsächlich Indikatoren wie Tier- und Pflanzenarten, deren Präsenz Aussagen zulässt, inwieweit die Überflutungsdynamik eines Auenabschnitts noch oder wieder naturnah ist. Dies zu wissen ist wichtig, denn „ … funktionierende Auen sind wie eine gute Versicherung“, so Mathias Scholz vom UFZ. „Sie beheimaten nicht nur bedrohte Arten, sondern puffern die Fluten ab und sorgen dafür, dass die Auswirkungen auf die Menschen geringer ausfallen. Deshalb brauchen wir hinreichend sichere Kriterien, um ökologische Folgen der Eingriffe in die Auenlandschaft prognostizieren zu können.“

Im Oktober 2009 hat das Bundesamt für Naturschutz den ersten Auenzustandsbericht vorgelegt. Demnach sind in Deutschland bereits zwei Drittel der einstigen Überschwemmungsflächen der Überflutungsdynamik der Flüsse entzogen, nur noch zehn Prozent der Überflutungsauen selbst sind in einem naturnahen Zustand. In einem weiteren Forschungsprojekt ermitteln nun UFZ-Wissenschaftler zusammen mit weiteren Forschungseinrichtungen, welche Bedeutung die Auenlandschaften als Lebensräume für Pflanzen und Tiere, für das Hochwassermanagement, die Nährstoffretention, den Gewässerschutz und den Klimawandel haben. „Unsere Ergebnisse werden wir einfließen lassen in Handlungsempfehlungen an die Politik“, erklärt Scholz, der die Auenforschung am UFZ koordiniert. Denn wichtige Funktionen und Dienstleistungen der Flusslandschaften wurden in den vergangenen Jahrzehnten kaum beachtet. „Auenlandschaften können vor extremen Überschwemmungen schützen, sie binden aber auch Treibhausgase, reinigen das Grundwasser und zählen zu den Lebensräumen mit der höchsten Artenvielfalt in Mitteleuropa“, so Scholz.

Neben der Erfassung der Gegebenheiten standen gezielte Veränderungen und deren Beobachtung auf dem Programm. Dort, wo die Elbe bei Roßlau (Ortsteil von Dessau-Roßlau in Sachsen-Anhalt) vorbeifließt, begann ein bislang für diesen Fluss einmaliges Experiment: Im Roßlauer Oberluch wurde 2006 landeinwärts ein neuer Deich gebaut und der alte geschlitzt. Rund 140 Hektar Altaue hatten die Chance, wieder überflutet und zur dynamischen Flussaue zu werden. Aber funktioniert das? Kann man den Hebel einfach wieder umlegen? Die UFZ-Wissenschaftler unter Leitung von Dr. Klaus Henle wollten diese Frage beantworten und erwarteten mit Spannung die erste Flut. Die Zeit bis dahin nutzten sie, um das künftige Auen-Stück mit einem Messnetz zu überziehen und den Status quo zu dokumentieren. Vor Ort untersuchten Botaniker, Zoologen, Bodenkundler und Hydrologen die für sie reservierten, dicht beieinander liegenden Areale. Die Ergebnisse wurden mit zwei Referenzgebieten in einer deichgeschützten und einer naturbelassenen Aue verglichen.

Im Frühjahr 2009 war es dann so weit: Erstmals überflutete ein Hochwasser das Rückdeichungsgebiet. Es begann wieder das intensive Zählen und Messen. Verändern sich die Zahl und die Aktivität der Schnecken, Laufkäfer und Heuschrecken bereits? Verschiebt sich die Struktur der Sedimente? Wie reagiert das Grundwasser? Um Aussagen über die Veränderungen treffen zu können, sind mehrjährige Datenreihen und entsprechende Auswertungen nötig. Ergebnisse werden mit Spannung erwartet. Erste Daten deuten bereits darauf hin, dass naturnahe Überflutungsverhältnisse geschaffen wurden und mit einem auentypischen höheren Grundwasserstand zu rechnen ist. Damit sind bereits nach kurzer Zeit typische Auenverhältnisse entstanden, an die sich Flora und Fauna nun wieder anpassen müssen. Die Auenrenaturierung braucht einen langen Atem. Die Roßlauer übrigens haben sich eingerichtet mit ihrem neuen Deich. Auch wenn die Elbe ihren Häusern jetzt näher kommt als früher – der neue Hochwasserschutz ist sicherer. *Marlis Heinz*

UFZ-Ansprechpartner:

Dr. Klaus Henle (Leiter), Mathias Scholz
Dept. Naturschutzforschung

e-mail: **klaus.henle@ufz.de; mathias.scholz@ufz.de**

Ministerialdirigent Dr. Fritz Holzwarth ist zuständig für die Unterabteilung Wasserwirtschaft im Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Aufgabenschwerpunkte sind fachliche und rechtliche Fragen der nationalen und internationalen Wasserwirtschaft und des Meeresschutzes.

WIR HABEN KEINE ZEIT MEHR ZU DISKUTIEREN

Seit 2010 ist Wasser als Menschenrecht anerkannt. Einklagbar ist dieses Recht nicht. Was ist zu tun, damit sich für die eine Milliarde Menschen, die keinen Zugang zu sauberem Wasser haben, etwas ändert?
Unabhängig davon, ob dieses Menschenrecht völkerrechtlich verbindlich ist oder nicht, ist mit dieser Anerkennung durch die Vereinten Nationen ein deutliches Signal gesetzt worden: Das Thema Wasser mit allen seinen Querbezügen muss noch viel stärker in unser Bewusstsein rücken. Bereits die in Johannisburg 2002 beschlossenen Milleniums-Entwicklungsziele beinhalten eine deutliche Verbesserung des Zugangs zu sauberem Trinkwasser und eine adäquate menschenwürdige Abwasserbeseitigung. Das werden wir bis 2015 nicht schaffen. Dazu bedarf es weiterer Anstrengungen, und zwar aller – der Politik, der Wirtschaft und der Wissenschaft.

Die Wirtschaft und die Politik haben sich lange Zeit gegen das Menschenrecht auf Wasser gesträubt. Wasser ist aber keine Ware – wie Strom, Gas oder Öl.
Wir dürfen die Debatte um das Menschenrecht auf Wasser nicht ideologisch überhöhen – weder von sozialer noch von wirtschaftlicher Seite. Das trägt nicht dazu bei, Probleme zu lösen. Es gibt einen breiten internationalen Konsens, dass es kein privates Eigentum an Wasservorkommen – egal wo auf dieser Welt – geben darf. Aber es muss möglich sein, die Bewirtschaftung, also die Wasserver- und Abwasserentsorgung, in private Hände zu legen. Ein wirklich gutes Beispiel ist Phnom Penh, die Hauptstadt Kambodschas. Dort ist es gelungen, das gesamte Wasserversorgungssystem zu erneuern, kosteneffiziente Abrechnungs- und Inkassosysteme sowie ein erstklassiges Management einzuführen, um alle Einwohner der Stadt mit Wasser zu versorgen. Dafür wurde die Wasserbehörde mit dem „Stockholm Industry Water Award 2010“ ausgezeichnet. Das Beispiel zeigt, es geht, wenn der politische Wille da ist, und die Menschen spüren, es wird besser.

Warum fehlt immer noch das öffentliche Bewusstsein für die globale Wasserknappheit?
Wir haben keine globale Wasserknappheit. Es handelt sich um regionale Wasserkrisen in der arabischen Welt, in großen Teilen Afrikas, Asiens, Südamerikas und immer mehr auch im Süden Europas. Insofern ist die Wasserdebatte eine andere als die Klimadebatte, bei der ein globales Regime dazu beitragen kann, nationale Maßnahmen zur Reduzierung klimaschädlicher Gase zu initiieren. Beim Klima reden wir außerdem über Szenarien für 2040, 2050 oder gar 2100. Bei der Wasserfrage haben wir in vielen Teilen der Welt einfach keine Zeit mehr, noch zu diskutieren, was zu tun ist. Hier ist es eine Minute vor Zwölf. Die Wasserkrise ist eine Governancekrise. Wir müssen das Integrierte Wasserressourcenmanagement (IWRM) flächendeckend und sektorübergreifend umsetzen, um endlich nachhaltig mit der Ressource Wasser umzugehen. Dazu brauchen wir auch einen Paradigmenwechsel. Bisher folgt das Angebot der Nachfrage nach Wasser. Wassermanagement muss aber die Nachfrageseite so organisieren, dass alle Potenziale von Einsparung oder Verteilung ausgenutzt sind und erst dann das Angebot erhöht wird. Der Druck kommt nicht primär vom Klimawandel. Bevölkerungswachstum, Energiebedarf, Landwirtschaft und Industrie sind die wirklichen Pressures. Häufig liegen die Probleme einfach in schlechtem Wassermanagement.

Worin sehen Sie dabei die größten Aufgaben für die Forschung?
1. In vielen Wasserkrisenregionen handelt es sich um eine Krise der Wassergovernance. Für gutes Management sind gute Verwaltung, gute Gesetzgebung notwendig. Wir benötigen für eine nachhaltige Wasserwirtschaft aber auch innovative Technologien. Deshalb besteht die Herausforderung für die Forschung darin, die notwendigen Brücken zwischen der Wassergovernance, den Natur-, Ingenieur- und Sozialwissenschaften zu bauen. **2.** Die Wasserforschung hat sich bisher ganz traditionell mit den unmittelbaren Fragen aus dem Wassersektor befasst. Wir brauchen also eine Wasserforschung, die die wasserabhängigen oder wasserrelevanten Sektoren der Wirtschaft einbezieht, die Wechselbeziehungen analysiert und Lösungsoptionen aufzeigt. **3.** Deutschland und Europa haben eine etablierte klassische Wasserforschung, die Zusammenhänge zwischen Ursache und Wirkung im Wasserkreislauf aufklärt. Wir entwickeln auch sehr anspruchsvolle technologische Lösungen. Aber nach wie vor haben wir über weite Strecken Defizite, unser hoch kompetentes Wissen auch angepasst in Ländern der Dritten Welt umzusetzen – und zwar so, dass die Menschen in diesen Ländern damit umgehen können. Ich bin zuversichtlich, dass die vom UFZ initiierte Water Science Alliance (siehe S. 28) ganz entscheidend dazu beitragen wird, diese Aufgaben zu lösen.

Das Interview führte Doris Böhme

STANDPUNKT: WASSERNUTZUNGSABGABEN ERHALTEN UND WEITERENTWICKELN!

Prof. Dr. Erik Gawel ist stellvertretender Leiter des Departments Ökonomie am UFZ und Direktor des Instituts für Infrastruktur und Ressourcenmanagement der Universität Leipzig. Seine Forschungsschwerpunkte sind die Finanzwissenschaft sowie die Umwelt- und Institutionenökonomik, insbesondere im Bereich der Ökonomie des Gewässerschutzes. Er leitete das UBA-Forschungsprojekt zur Zukunft der Wassernutzungsabgaben.

e-mail: erik.gawel@ufz.de

Wasser wird für so unterschiedliche Zwecke wie Nahrungsmittelanbau, Industrieproduktion, Energiebereitstellung oder Gebrauch im Haushalt benötigt. Menschlicher Wassergebrauch greift dabei in den natürlichen Wasserhaushalt ein und schließt alternative Nutzungen aus – Wassernutzung „kostet" uns also etwas, Wasser ist ökonomisch „knapp". Diese Knappheit darf nicht mit „Wassermangel" verwechselt werden. Auch bei Brot oder Mobiltelefonen herrscht in Deutschland gewiss kein „Mangel", wohl aber ökonomische Knappheit dieser Güter, die genau deshalb zu Recht einen Preis tragen: Dieser zeigt den Wert an, der den entgangenen Nutzungsmöglichkeiten der in ihnen verarbeiteten Ressourcen zukommt. Preise machen eine effiziente Lösung von Knappheitskonflikten möglich. Dies bedeutet, dass sich Nutzungen mit dem höchsten Überschuss des wirtschaftlichen Vorteils über die gesellschaftlichen Kosten durchsetzen.

Kostendeckende Wasserpreise leisten eine solche „effiziente" Zuteilung, indem sie jedem Nutzer den vollen Werteverzehr anzeigen, den gerade seine Nutzung für die Gesellschaft bedeutet. Artikel 9 der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) greift diesen Gedanken auf: Danach soll die Wasserpreispolitik der EU-Mitgliedsstaaten das Prinzip der vollen Kostendeckung bei Wasserdienstleistungen wie Abwassereinleitung oder Wasserentnahme berücksichtigen. Neben den bloßen Bereitstellungskosten der Dienstleistungen gehören dazu ausdrücklich auch die Umwelt- und Ressourcenkosten, also die ökologischen Auswirkungen der Wassernutzung, die ein Ver- oder Entsorger typischerweise betriebswirtschaftlich nicht „einpreist".
Weltweit werden Wasserprobleme durch Verstoß gegen diese Kostendeckungsregel verschärft: Zu einem verschwenderischen Umgang mit knappem Wasser tragen gerade niedrige, vielfach subventionierte Wasserpreise bei – insbesondere in der landwirtschaftlichen Bewässerung, wo fast 70 Prozent allen weltweit entnommenen Wassers eingesetzt werden. Wasserpreise haben jedoch nicht nur die Funktion, Nutzer zu effizienten Verbrauchsentscheidungen anzuhalten. Zugleich bringen sie die Finanzierungsmittel auf, die eine Bereitstellung von Wasserdienstleistungen überhaupt erst ermöglichen. Auf der anderen Seite entziehen sie den Nutzern Kaufkraft, was bei sozial schwächeren Wassernutzern zu Problemen der Erschwinglichkeit führen kann und einer weltweiten Anwendung der Strategie kostendeckender Wasserpreise enge Grenzen setzt.

In Deutschland richtet sich der Auftrag kostendeckender Preise aus Artikel 9 der WRRL zunächst an die kommunalen Abwassergebühren und Trinkwasserentgelte, wo (betriebswirtschaftliche) Kostendeckung zumindest formal seit langem zum Standard gehört. Von besonderem Interesse sind daher Instrumente zur verursachergerechten Anlastung der zusätzlichen Umweltkosten. Deutschland verfügt mit der Bundes-Abwasserabgabe und den in derzeit elf Bundesländern erhobenen Wasserentnahmeentgelten weit vor der WRRL über derartige Preis-Instrumente. Das Abwasserabgabengesetz von 1976 kann sogar – lange vor Öko-Steuer und Emissionshandel – als Pionier des Einsatzes von Umweltanreizinstrumenten in der Praxis gelten. Ebenso lange währt freilich die kritische Begleitung dieser Instrumente in Wissenschaft und Politik: Forderungen nach einer Revitalisierung der als zu lasch empfundenen Lenkungsinstrumente stehen dabei wiederholten Rufen nach ihrer Abschaffung gegenüber. Dass bei der Kritik die organisierten Interessen der zur Zahlung Verpflichteten (kommunale Unternehmen, industrielle Direkteinleiter und Eigenförderer) in der ersten Reihe stehen, kann kaum überraschen. Die Wassernutzungsabgaben erfüllen jedoch eine wichtige Funktion bei der Anlastung von Umweltkosten, die sie unersetzlich machen: Zwar müssen die Ver- und Entsorger im Interesse des Gewässerschutzes kostenträchtige ordnungsrechtliche Vorgaben beachten, die bereits einen Teil der „externen Lasten" verursachergerecht zuordnen. Die verbleibenden Wassernutzungen bleiben aber grundsätzlich unentgeltlich. Hier setzen die Abgaben an.

Für die deutsche Debatte um die Zukunft der Wassernutzungsabgaben ist damit klar: Ein Bekenntnis zu marktwirtschaftlicher Umweltpolitik und zu effizienter Zielerfüllung im Gewässerschutz muss zugleich ein Bekenntnis zu einer spürbaren Zahllast auf die „Restnutzung" einer Wasserressource darstellen. Nur so kann das Kostendeckungsprinzip vollständig umgesetzt werden. Und dieser Anreiz kann nur durch Abgaben bereitgestellt werden, nicht jedoch durch ordnungsrechtliche Anforderungen und auch nicht durch Gebühren oder Entgelte. Wassernutzungsabgaben bieten deshalb im Rahmen einer marktwirtschaftlichen Gewässerschutzpolitik einen einzigartigen Mehrwert. Sie gehören also mitnichten abgeschafft, wie viele aus durchsichtigen Motiven meinen; sie sollten vielmehr künftig zu dem werden, was sie von Anfang an sein sollten: ein marktwirtschaftlicher Faktorpreis, der das knappe und lebenswichtige Gut Wasser genauso behandelt wie alle anderen Güter auch, die wie selbstverständlich ihren Knappheitspreis tragen und so Produzenten und Konsumenten im Gemeinwohlinteresse zu effizienten Ressourcen-Entscheidungen anhalten.

Ein Lösungsansatz für die Vermeidung hoher Nährstoffeinträge in die Gewässer liegt darin, Ackerland im Bereich von Flussauen extensiv zu bewirtschaften. Im Zuge der EU-Klimapolitik tut sich aber in dieser Hinsicht ein Zielkonflikt auf, denn der Ausbau der Erneuerbaren hat im Bereich der Bioenergie eher eine Intensivierung der Landwirtschaft zur Folge: Anbauflächen werden ausgedehnt, der Verbrauch von Wasser und Dünger steigt.

(Quelle: www.fotolia.com)

GEMEINSAM ZU GUTEN GEWÄSSERN

Alle europäischen Grund- und Oberflächengewässer sind in einem „guten Zustand". Sie weisen nicht nur eine gute chemische Wasserqualität auf, sondern sind zugleich auch ein attraktiver Lebensraum für Tiere und Pflanzen. Sie werden flussgebietsbezogen bewirtschaftet – von der Quelle bis zur Mündung unter Einschluss aller Zuflüsse und der Küstengewässer. Dadurch können vielfältige Nutzungen realisiert werden – Trinkwassergewinnung, Landwirtschaft, Schifffahrt, Tourismus, Artenschutz. Grundwasser ist in ausreichenden Mengen vorhanden und enthält keine Schadstoffkonzentrationen, die das Ökosystem gefährden könnten. Eine Vision mit ambitionierten Umweltzielen, die bis 2015 Wirklichkeit werden soll. So sieht es die EG-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) aus dem Jahr 2000 vor. Damit wurde innerhalb der Europäischen Union ein Ordnungsrahmen für eine gemeinschaftliche Wasserpolitik geschaffen, der einen grundsätzlichen Richtungswechsel markiert.

Aber ist die Wasserwirtschaft in der EU auf dem richtigen Weg, um diese Ziele im gesteckten Zeitrahmen zu erreichen? Welche Probleme gibt es bei der Umsetzung und wie können sie beseitigt werden? Sind die Verwaltungsgefüge auf die neuen Aufgaben vorbereitet? Mit diesen und anderen Fragen zum nachhaltigen Wasserressourcenmanagement und den durch die WRRL geschaffenen neuen Verantwortungsstrukturen befassen sich seit mehreren Jahren Wissenschaftler des UFZ aus den Bereichen Ökonomie, Recht und Philosophie. In einem aktuellen, vom BMBF geförderten Projekt analysieren sie unter anderem, wie Anreize aus der europäischen und nationalen Gesetzgebung das Entscheidungsverhalten der Akteure im Flussraum prägen, und diskutieren, welche Modelle sich zur Lösung von Nachhaltigkeitsproblemen eignen. Zusätzlich wollen sie auf der Grundlage von eigenen Empfehlungen zur verbesserten Wahrnehmung der wasserwirtschaftlichen Ziele beitragen.

Für Projektleiter Dr. Bernd Klauer ist die Governance-Dimension zentral für das Projekt. „Unsere Leitfragen sind: Welchem staatlichen und privaten Akteur wird für welche Aufgabe welche Verantwortung zugewiesen? Sind diese Akteure aufgrund ihrer Macht und ihrer rechtlichen Kompetenz überhaupt in der Lage, Verantwortung zu übernehmen und die ihnen vorgegebenen Ziele zu erreichen? Verschärft wird diese Problematik dadurch, dass Flüsse inklusive ihrer Schadstofffrachten typischerweise administrative Grenzen überschreiten." So müssen beispielsweise bei der Bewirtschaftung der Elbe zehn Bundesländer zusammenarbeiten und auch die Nachbarstaaten Polen, Österreich und Tschechien einbezogen werden. Zu den Problemen der räumlichen Koordination kommen noch die der sachlichen: „Der Zustand der Gewässer wird nicht allein durch die Wasserwirtschaft bestimmt. Wenn in der Agrar- und der Binnenschifffahrtspolitik nicht demnächst einige wegweisende Schritte unternommen werden, werden die zehn Milliarden Euro, die Deutschland bis 2015 für die Umsetzung der WRRL investieren möchte, bei weitem nicht die Wirkung zeitigen, die man sich erhofft. Das verfügbare Planungsinstrumentarium reicht gegenwärtig nicht aus, um diese Koordinationsprobleme angemessen zu bewältigen", erklärt Bernd Klauer.

Insgesamt bestehen schon heute große Schwierigkeiten, die Umweltziele fristgerecht zu erreichen. Angesichts der Tatsache, dass an rund 82 Prozent der Oberflächen- sowie an 36 Prozent der Grundwasserkörper Fristverlängerungen in Anspruch genommen werden, ist unklar, ob die Bundesländer die Reduzierung der Gewässerbelastungen in ausreichendem Maße vorantreiben. Insbesondere das Ziel des guten ökologischen Zustandes bereitet Deutschland Probleme – vor allem im Hinblick auf die Nährstoffbelastungen und die Vielzahl der morphologisch stark veränderten Fließgewässer. Um den Flüssen wieder mehr Raum zu geben, braucht man Flächen – die meisten davon werden aber landwirtschaftlich genutzt. Der Eintrag von Nitraten, Phosphor und Pestiziden in die Gewässer stellt nach wie vor eine der Hauptbelastungen dar. Die Leipziger Wissenschaftler weisen darauf hin, dass eine Abstimmung von Agrar- und Wasserpolitik unumgänglich ist, will man die Ziele der WRRL nicht aus den Augen verlieren. „Die europäische Agrarpolitik muss sich ihrer Verantwortung für die Gewässer bewusst sein. Ist sie es nicht, kann dies auf der Ebene der Flusseinzugsgebiete kaum mehr korrigiert werden", führt Prof. Wolfgang Köck an. Zu den Stellschrauben, die auf der europäischen respektive nationalen Ebene bewegt werden müssen, gehören nach Meinung des Umweltrechtsexperten nicht nur die Förderwerkzeuge, sondern auch eingreifende Steuerungsinstrumente, wie etwa Abgaben auf Pestizide und Düngemittel.

Bettina Hennebach

UFZ-Ansprechpartner:

Dr. Bernd Klauer, Dr. Johannes Schiller
Dept. Ökonomie

e-mail: **bernd.klauer@ufz.de, johannes.schiller@ufz.de**

Prof. Dr. Wolfgang Köck
Leiter Dept. Umwelt- u. Planungsrecht

e-mail: **wolfgang.koeck@ufz.de**

STANDPUNKT: ZEHN JAHRE UMSETZUNG WRRL – EIN KRITISCHES FAZIT

Prof. Dr. Dietrich Borchardt leitet das Department „Aquatische Ökosystemanalyse und Management“ am Standort Magdeburg und ist Inhaber einer gleichnamigen Professur an der TU Dresden. Er ist zudem Sprecher des UFZ-Fachbereiches „Wasser- und Bodenforschung“ und verantwortlich für das Programm-Topic „Nachhaltiges Wasserressourcenmanagement“ am UFZ.

e-mail: dietrich.borchardt@ufz.de

Wo stehen wir im Gewässerschutz in Deutschland und Mitteleuropa zehn Jahre nach Inkrafttreten der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) – eine europäische Umweltrichtlinie, die für viele Akteure kein bürokratisches Monster aus Brüssel war, sondern ein innovatives Instrument und großer Hoffnungsträger für mehr Gewässerschutz? Zunächst ist festzuhalten, dass die formale Umsetzung in nationales Recht und die Fristen bei der Bestandsaufnahme und Aufstellung der Maßnahmenpläne in Deutschland im Wesentlichen eingehalten wurden. Das trifft leider nicht für alle Mitgliedsstaaten der Europäischen Union zu. Die Zahlen zum Gewässerzustand dagegen sind für Deutschland ernüchternd: Nach jahrzehntelangen Anstrengungen ist man vom übergeordneten Ziel, bis 2015 einen „guten ökologischen“, „guten mengenmäßigen“ oder „guten chemischen“ Zustand für die Oberflächengewässer und das Grundwasser zu erreichen, weit entfernt. In der Bundesrepublik werden “Ausnahmetatbestände” als Fristverlängerung für rund 82 Prozent aller Oberflächengewässer (einschließlich “stark veränderter” und „künstlicher“ Wasserkörper), in den Grundwasserkörpern in zirka 36 Prozent der Fälle in Anspruch genommen. Ähnliche Zahlen werden auch von den anderen Mitgliedsstaaten der EU gemeldet werden. Die gute Nachricht: Ein “guter chemischer Zustand” wird in rund 88 Prozent der Wasserkörper erreicht. Ein unbestreitbar großer Erfolg im Gewässerschutz, insbesondere bei der Verminderung der Abwasserbelastungen aus Industrie und Siedlungen, der aber nicht der Einführung der WRRL, sondern der konsequenten Anwendung des Verursacherprinzips im Abwassersektor in den zurückliegenden Jahrzehnten zu verdanken ist.

Dass die Fristverlängerungen in Anspruch genommen werden, ist aufgrund der oben genannten Tatsachen zum jetzigen Zeitpunkt zwangsläufig und richtig. Aber führt das nicht letztendlich dazu, dass „mindere Umweltziele“ und die „Ausnahmetatbestände“, die ja heute bereits die Regel darstellen, langfristig festgeschrieben werden? Und würde dann dem Gewässerschutz nicht mit viel Berichts- und Bewertungsaufwand ein Bärendienst erwiesen? Um es vorweg zu nehmen: Ja, das kann passieren, wenn es nicht gelingt, in folgenden Punkten substanzielle Fortschritte zu erzielen:

1. Das Verursacherprinzip, das im industriellen und kommunalen Abwassersektor so konsequent und erfolgreich verfolgt wurde, ist auch auf diejenigen Nutzer anzuwenden, die heute für die ökologischen Defizite und den Verlust ökologischer Funktionen maßgeblich verantwortlich sind. Dazu gehören der Ausbauzustand der Gewässer, die Stauregulierung einschließlich der Wasserkraftnutzungen und Schifffahrt sowie vor allem die Landwirtschaft.

2. Ein zentrales Problem ist die mangelnde Verfügbarkeit von Flächen für den Natur- und Gewässerschutz. Ausreichend breite Gewässerkorridore beispielsweise würden naturnähere Lebensräume schaffen, die Biodiversität erhöhen, Nährstoffeinträge reduzieren und mutmaßlich selbst die Wirkungen von Pestizideinträgen mindern können.

3. Zukünftig muss sehr viel konsequenter als bisher ein effektiverer Gewässerschutz in den Agrarumweltmaßnahmen verankert werden. Es muss entschieden werden, wo freiwillige Maßnahmen nicht ausreichen und demzufolge Nutzungseinschränkungen notwendig sind – mit oder ohne Ausgleich. Auch dürfen mühsam errungene Erfolge beim Rückgang der Nährstoffbelastungen nicht durch das aus einer Gesamtperspektive ohnehin fragwürdige Hochschrauben von Bioenergiequoten wieder zunichte gemacht werden.

4. Gegenwärtig werden in den Bewirtschaftungsplänen klimatische Veränderungen als noch wenig relevant angesehen. Die heute schon bemerkbaren Folgen des Klimawandels wie längere Trockenperioden oder eine Zunahme von Hochwasserereignissen und notwendige Anpassungsstrategien sind aber zu beachten. Außerdem dürfen tatsächliche oder vermeintliche Einflüsse des Klimawandels zukünftig nicht als Begründung dafür herangezogen werden, erforderliche Gewässerschutzstrategien nicht umgesetzt zu haben.

Schwerpunkte für die zukünftigen Gewässerschutzstrategien liegen also in der Landwirtschaft, Energiegewinnung und Verkehrspolitik und damit außerhalb der Wasserwirtschaft. Eine Schlüsselrolle für das Erreichen der ökologischen Ziele spielt der Ausgleich der unterschiedlichen Nutzerinteressen in ganz unterschiedlichen Politikfeldern, der mit den herkömmlichen Instrumenten aber nicht zu erzielen ist. Die WRRL bietet dabei nach wie vor eine Chance, aber keine Gewähr, durch eine ökologisch verträgliche Gestaltung der Nutzungen das erforderliche Maß an Gewässerschutz zu erreichen – und dabei die nachhaltige Gewässerbewirtschaftung mit anderen Schutzzielen zu verbinden. Scheitert dies, so wäre eine einmalige Chance vertan. Gelingt dies, so wären Deutschland und Europa mit entsprechender Signalwirkung führend bei der Lösung einer weltweiten Zukunftsaufgabe – einer nachhaltigen Balance zwischen der Nutzung und dem Schutz einer Schlüsselressource.

KURZINFORMATIONEN

WATER SCIENCE ALLIANCE

Die Water Science Alliance ist ein Instrument zur Bündelung und Stärkung der deutschen Wasserforschung. Um die großen Herausforderungen im Wasserbereich zu bewältigen, ist ein ganzheitlicher Forschungsansatz notwendig, der die verschiedenen Natur- und sozialökonomischen Wissenschaften integriert und dessen Lösungsstrategien über den Wassersektor hinausgehen.

Die sechs bisher ausgewiesenen Forschungsbereiche der Water Science Alliance (White Paper) sind:

1. **Einfluss des Globalen Wandels auf die Wasserressourcen (Szenarienentwicklung)**
2. **Innovationen für ein nachhaltiges Wasserressourcen-Management**
3. **Quantifizierung von Wasser- und Stoffkreisläufen auf der regionalen Skala: Schutz von Umwelt und Gesundheit**
4. **Integrierte Observations- und Explorationskonzepte**
5. **Entwicklung komplexer Systemmodelle und Datenintegration**
6. **Komplexes Wassermanagement im Circum-Mediterranen Raum**

Die Water Science Alliance wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) unterstützt. Das UFZ hat 2009 vom Helmholtz-Senat das Mandat erhalten, die Water Science Alliance zu entwickeln.

DFG

Bundesministerium für Bildung und Forschung

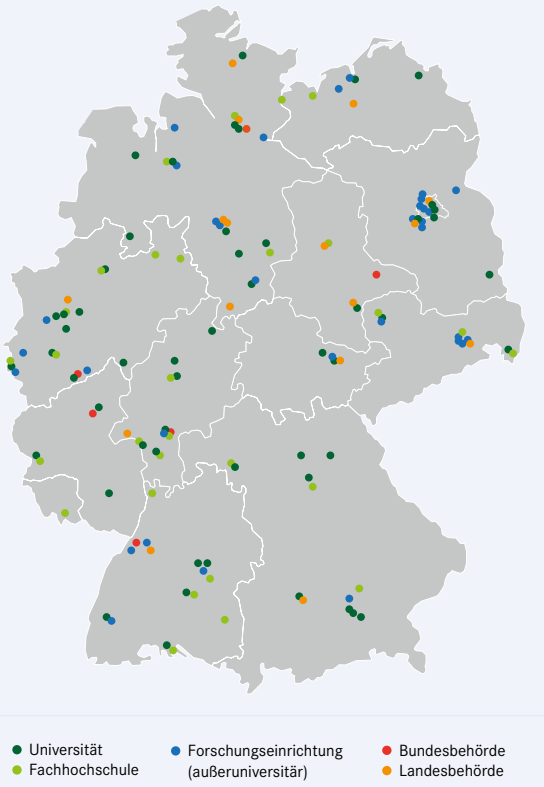
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Water Research Horizon Conference

Im Rahmen der Water Science Alliance findet jedes Jahr eine Water Research Horizon Conference statt. Mit der zweiten Veranstaltung am 8./9. Juni 2011 in Berlin zum Thema „New Concepts in Model Development and Data Integration for Understanding Water, Matter and Energy Fluxes at Management Scale“ sollen die Diskussionen zu zwei der sechs Themenbereiche des White Paper konkretisiert und erste Projekte und Projektanträge initiiert werden. Das BMBF stellt seinen neuen Förderschwerpunkt „Nachhaltiges Wassermanagement“ vor.

WASSERFORSCHUNG IN DEUTSCHLAND – EINRICHTUNGEN

Stand November 2010



Kontakt: Elisabeth Helen Krüger, elisabeth.krueger@ufz.de, **www.watersciencealliance.de**

IWAS UND WESS

Zwei wichtige Bausteine der Water Science Alliance sind die Internationale Wasserforschungsallianz Sachsen (IWAS) und die Water and Earth System Science (WESS).

In **IWAS** entwickeln Wissenschaftler des UFZ und der Technischen Universität Dresden sowie Praxispartner wie die Stadtentwässerung Dresden GmbH/Gelsenwasser AG angepasste Systemlösungen für die jeweiligen Wasserprobleme in verschiedenen Regionen der Erde (Osteuropa/Ukraine, Zentralasien/Mongolei, Mittlerer Osten/Saudi Arabien und Oman, Südostasien/Vietnam sowie Lateinamerika/Brasilien). IWAS wird durch das BMBF im Rahmen des Programms „Spitzenforschung und Innovation in den Neuen Ländern“ gefördert.

Kontakt: Prof. Dr. Dietrich Borchardt, Dept. Aquatische Ökosystemanalyse, dietrich.borchardt@ufz.de; Prof. Dr. Peter Krebs, Institut für Siedlungs- und Industriewasserwirtschaft, TU Dresden, peter.krebs@tu-dresden.de, **www.iwas-sachsen.ufz.de**

In **WESS**, einer Kooperation mit den Universitäten Tübingen, Stuttgart und Hohenheim, werden die Auswirkungen sich verändernder Umweltbedingungen auf den Wasserkreislauf und Stoffflüsse in Wasser, Boden und Atmosphäre untersucht (siehe S. 12).

Kontakt: Dr. Hermann Rügner (WESS-Koordinator), Universität Tübingen, h.ruegner@uni-tuebingen.de, **www.wess.info**

INFRASTRUKTUREN

TASK

Das Terra-, Aqua- und Sanierungskompetenzzentrum Leipzig (TASK) hat das Ziel, die Sichtbarkeit, Akzeptanz und Vermarktungsmöglichkeiten von neuen innovativen Technologienund Konzepten aus den Bereichen Boden, Grundwasser, Altlastensanierung und Flächenrevitalisierung zu steigern und zu verbessern. TASK kümmert sich um die gezielte Verwertung von Forschungsergebnissen, die ein hohes innovatives Potenzial besitzen. Das können sowohl technische Verfahren und Methoden, Modelle, Managementkonzepte als auch Handlungsempfehlungen und Normen sein. Mit Unterstützungsmaßnahmen wie Technologiedemonstrationen, Feldanwendungen, Produktberatungen oder Messeauftritten fördert und stärkt TASK die Produktpositionierung auf geeigneten Absatzmärkten im nationalen und internationalen Raum. TASK wird seit 2007 durch das BMBF und das UFZ gefördert und durch ein ständiges Netzwerk aus Wissenschaftlern, Vertretern der ingenieurtechnischen und behördlichen Praxis, Industrie und Politik unterstützt. **www.task-leipzig.info**

Megasite Management Toolsuite (MMT)

Wenn es um die erfolgreiche Nachnutzung von Megasites (siehe S. 18/19) geht, sind viele Akteure beteiligt: Flächeneigentümer, Behörden, Investoren, Ingenieurbüros und Stadtplaner müssen sich untereinander abstimmen und ihr Vorhaben für die Öffentlichkeit transparent kommunizieren. Dafür ist es wichtig, verschiedene Nutzungsszenarien durchzuspielen, um Kosten abschätzen zu können und Planungen zu optimieren. Mit der Megasite Management Toolsuite (MMT) haben Wissenschaftler des UFZ und der Universität Tübingen ein Software-Werkzeug entwickelt, das es den Akteuren ermöglicht, ihre Visionen in wirtschaftlich attraktive, zukunftsfähige Nachnutzungsvarianten umzuwandeln. Miteinander vernetzte und mit einem geografischen Informationssystem verknüpfte Module liefern dem Anwender verlässliche Daten und Zahlen, wie das Potenzial des Standortes optimal ausgenutzt werden kann. Wenn man weiß, wo sich altlastbedingte Konfliktflächen befinden, hilft die Toolsuite abzuschätzen, mit welchen Methoden diese saniert werden könnten und bis zu welchem Grad das möglich ist oder was passiert, wenn man nicht sanieren will und stattdessen die Nutzung ändert. Die MMT dient damit als Entscheidungshilfe im komplexen Prozess der Flächenrevitalisierung und wird in Kooperation mit Partnern aus der Sanierungspraxis ständig weiterentwickelt. **www.safira-mmt.de**

UFZ-Flussforschungsschiff ALBIS

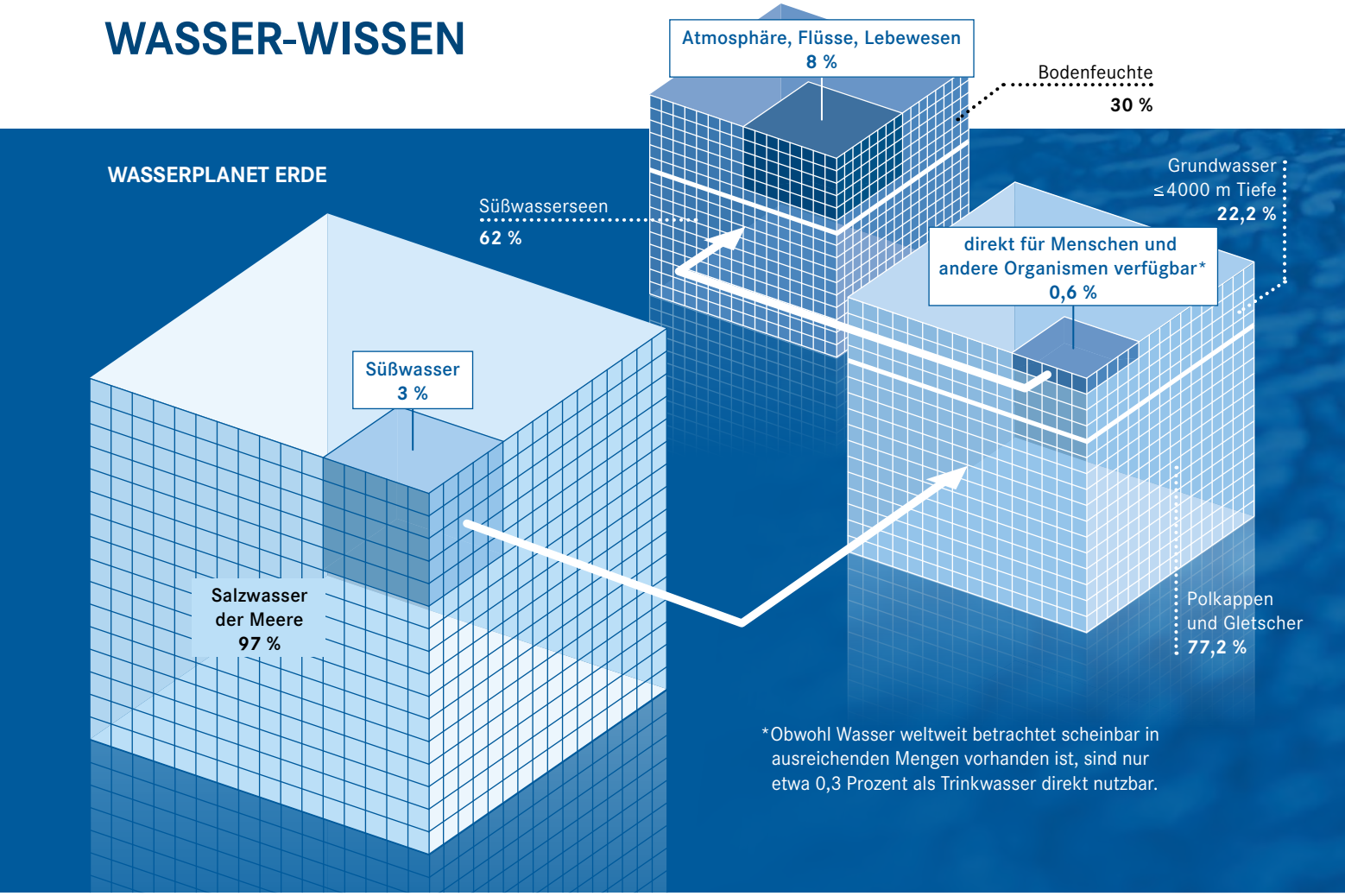
Mit der ALBIS steht den Wissenschaftlern des UFZ ein Forschungsschiff zur Verfügung, das es ermöglicht, Wasser- und Sedimentproben an einer beliebigen Stelle im Fluss zu nehmen – sei es bei extremem Niedrigwasser, in flachen Flüssen, Gewässerrandzonen oder in Buhnenfeldern – und diese unverzüglich an Bord zu bearbeiten. Das 15 Meter lange und vier Meter breite Schiff hat einen Tiefgang von nur 50 Zentimetern. Es hat seit seiner Schiffstaufe im Jahr 1998 zahlreiche Forschungsfahrten mit etwa 1.000 Kilometern pro Jahr auf Flüssen wie der Elbe, Saale, Weser, Werra oder Fulda hinter sich. Im Mittelpunkt der Untersuchungen in den letzten Jahren standen Transport und Umsatz von gelösten und partikulären Spurenstoffen im Gewässer. Gegenwärtig rücken Ökosystemuntersuchungen zur Steuerung des Makrozoobenthos (Gewässerbodenfauna) in Fließgewässern, zum Einfluss invasiver Arten auf aquatische Lebensgemeinschaften und Ökosystemfunktionen oder zur Dynamik hyporheischer Nahrungsnetze (also an der Grenzzone zwischen Fließgewässern und angrenzenden Grundwasserleitern) in den Fokus der Gewässerforscher.

Foto: Sven Schulz / Flussgebietsgemeinschaft Elbe

GERMAN WATER PARTNERSHIP (GWP)

Die German Water Partnership ist ein Netzwerk, in dem sich private und öffentliche Unternehmen aus dem Wasserbereich, Fachverbände und Institutionen aus Wirtschaft, Wissenschaft und Forschung unter einem Dach zusammengeschlossen haben. Unterstützt wird diese Initiative von den Bundesministerien für Umwelt, Forschung, Entwicklung, Wirtschaft sowie dem Auswärtigen Amt. Die German Water Partnership bündelt die Aktivitäten, Informationen und Innovationen des deutschen Wassersektors, um die Wettbewerbsposition von Wirtschaft und Forschung auf den internationalen Märkten zu stärken. Das Netzwerk verbessert die Rahmenbedingungen für die Geschäftsfeldentwicklung im Ausland, treibt Innovationen voran und trägt mit angepassten, integrierten und nachhaltigen Ansätzen zur Lösung wasserwirtschaftlicher Probleme weltweit bei. **www.germanwaterpartnership.de**

WASSER-WISSEN



DIE EUROPÄISCHE WASSERRAHMENRICHTLINIE WRRL

Die WRRL wurde im Dezember 2000 von der Europäischen Union ins Leben gerufen. Sie fordert einen guten chemischen und ökologischen Zustand aller europäischen Gewässer bis 2015. Auf keinen Fall darf sich die Qualität bis dahin verschlechtern. Die Richtlinie bezieht sich auf Oberflächengewässer (Flüsse und Seen, teilweise auch Feuchtgebiete), Grundwasser, den Küstenbereich und Übergangsgewässer (zwischen Flüssen und Meeren).
Das dazu notwendige moderne Management von Flussgebieten und Gewässereinzugsgebieten beinhaltet unter anderem, dass das Einleiten gefährlicher Stoffe schrittweise reduziert bzw. beendet wird, dass die Selbstreinigungskraft der Gewässer, natürliche Abflussverhältnisse und natürliche Überflutungsflächen erhalten oder wieder hergestellt werden und Wasserressourcen nachhaltig genutzt werden.

Die Bewirtschaftung der Flüsse soll sich nicht mehr nach Landesgrenzen richten, sondern nach Flusseinzugsgebieten. Dabei übernehmen internationale Kommissionen die Umsetzung der WRRL (IKSO / Internationale Kommission zum Schutz der Oder; IKSE / Elbe; IKSR / Rhein; IKSD / Donau). Für nationale und internationale Flussgebietseinheiten soll jeweils ein Bewirtschaftungsplan aufgestellt werden.

Zur Umsetzung der WRRL gibt die EU einen Zeitplan vor:

- **2003**
  Umsetzung in nationales Recht
- **2004**
  erste Bestandsaufnahme zum Gewässerzustand in den Flussgebieten
- **2006**
  Einrichtung der Monitoring-Netze
- **2009**
  Fertigstellung der Bewirtschaftungspläne und Maßnahmenprogramme
- **2012**
  Umsetzung von Maßnahmen
- **2015**
  Erreichen der Umweltziele

WASSER ZUM LEBEN

Etwa **1 Milliarde** Menschen verfügen über weniger als **20 Liter** Wasser pro Tag. Etwa **1 Milliarde** Menschen haben keinen Zugang zu sauberem Trinkwasser. Etwa **2,6 Milliarden** Menschen leben ohne angemessene sanitäre Abwasserentsorgung.

Der weltweite Wasserverbrauch hat sich zwischen 1940 und 1990 vervierfacht, die Weltbevölkerung hat sich in der gleichen Zeit verdoppelt.

Verschmutztes Trinkwasser ist weltweit die häufigste Krankheitsursache (Durchfall, Cholera, Typhus, Wurmbefall, Augenkrankheiten).

Ein Mensch braucht täglich – je nach Klimazone – **zwischen 2 und 5 Liter** Wasser zum Überleben.

Wasserarm ist nach Angaben des World-Watch-Institutes ein Land, in dem weniger als **2,74 Liter** Wasser pro Person und Tag zur Verfügung stehen.

Der Mensch besteht zu **60 bis 70 Prozent** aus Wasser; keine Körperfunktion und keins unserer Sinnesorgane funktioniert ohne Wasser.

WASSERVERBRAUCH

Etwa zwei Drittel des Frischwassers benötigt die Landwirtschaft.

Um ein Kilo Getreide zu produzieren, braucht man etwa **1.300 Liter** Wasser, für ein Kilo Rindfleisch sind es rund **15.000 Liter**.

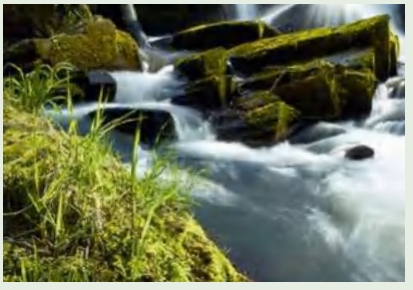
Rund **23 Prozent** des weltweit genutzten Wassers werden in der Industrie eingesetzt.

Ein US-Amerikaner verbraucht täglich im Haushalt etwa **250 Liter** Wasser, ein Europäer durchschnittlich **160 Liter**, ein Deutscher etwa **120 Liter**, ein Inder **25 Liter**, ein Afrikaner **20 Liter**.

VIRTUELLES WASSER

Als virtuelles Wasser (verstecktes Wasser) wird jenes Wasser bezeichnet, das zur Erzeugung eines Produkts aufgewendet wird. So stecken in einem PKW bis zu 300.000 Liter Wasser, in 1 kg Bananen 1.000 Liter oder in 1 kg Hühnereiern rund 4.500 Liter Wasser. So gerechnet verbraucht jeder Deutsche pro Tag rund 4.000 Liter Wasser. Den Begriff des virtuellen Wassers prägte der englische Geograf John Anthony Allan um 1995. Für seine Leistung erhielt er 2008 den „Stockholmer Wasserpreis“.

BLAUES UND GRÜNES WASSER



Das Wasser in Flüssen und Seen, das Grundwasser und das in den Gletschern gespeicherte Wasser wird als blaues Wasser bezeichnet. Das blaue Wasser macht nur einen Teil des Süßwasservorkommens der Erde aus. Der größere Teil, der in Pflanzen und im Boden steckt, wird grünes Wasser genannt. Chance und Herausforderung zukünftiger Wasserbewirtschaftung ist es deshalb, das große Potenzial an grünem Wasser besser verfügbar zu machen, oder die Möglichkeiten, Regenwasser als grünes Wasser in Boden und Pflanzen oder als blaues Wasser zu speichern, auszubauen. Ein Ansatz dieser „Wasserernte“ ist, die direkte Verdunstung aus dem Boden zu verhindern und die Speicherfähigkeit von Boden und Vegetation zu erhöhen.

Impressum

Herausgeber: Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ
Presse- und Öffentlichkeitsarbeit · Permoserstraße 15 · 04318 Leipzig
Tel.: 0341 / 235-1269 · Fax: 0341 / 235-1468 · e-mail: info@ufz.de · Internet: www.ufz.de

Gesamtverantwortung: Doris Böhme, Leiterin Presse- und Öffentlichkeitsarbeit

Textredaktion: Doris Böhme und Susanne Hufe (verantw.)

Bildredaktion: André Künzelmann (verantw.)

Fotos: André Künzelmann

Satz und Layout: noonox media GmbH, Leipzig

Druck: Fritsch Druck GmbH, Leipzig

Gedruckt auf 100% Recyclingpapier

Juni 2011

HELMHOLTZ
ZENTRUM FÜR
UMWELTFORSCHUNG
UFZ

ISSN 1868-7512

FORSCHEN FÜR DIE UMWELT

Im **Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ** erforschen Wissenschaftler die Ursachen und Folgen der weit reichenden Veränderungen unserer Umwelt. Ihre Aufgabe besteht darin, zur Lösung konkreter Umweltprobleme beizutragen. Für Politik, Wirtschaft und Gesellschaft stellen sie Wissen über die komplexen Systeme und Beziehungen in der Umwelt bereit und empfehlen Instrumente und Handlungskonzepte.

Die Helmholtz-Forscher befassen sich mit dem Management von Wasserressourcen und den Folgen des Landnutzungswandels für die biologische Vielfalt und die Ökosystemfunktionen. Sie entwickeln Sanierungsstrategien, Monitoring- und Erkundungsmethoden für kontaminiertes Grund- und Oberflächenwasser, Böden und Sedimente. Sie untersuchen das Verhalten und die Wirkung von Chemikalien in der Umwelt und auf die Gesundheit und das Immunsystem des Menschen und arbeiten an Modellen zur Vorhersage von Umweltveränderungen. Dabei berücksichtigen sie sozialwissenschaftliche und ökonomische Fragestellungen. Die naturwissenschaftlich ausgerichtete Umweltforschung ist deshalb am UFZ eng mit den Human-, Sozial- und Rechtswissenschaften vernetzt.

Das UFZ wurde 1991 gegründet und hat heute etwa 1.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter und ein Gesamtbudget von mehr als 90 Millionen Euro. Seit seiner Gründung ist einer der Forschungsschwerpunkte des UFZ das Management der Ressource Wasser. Lag der Fokus in den neunziger Jahren noch sehr stark auf dem Umgang mit Altlasten in Grund- und Oberflächengewässern und deren nachhaltiger Sanierung, ist der Forschungsansatz der etwa 150 „Wasserforscher“ des UFZ heute ein viel breiterer. Mit seiner Expertise auf den Gebieten der Erkundung, des Monitorings, der Modellierung und Visualisierung von Prozessen und Stoffflüssen in aquatischen Ökosystemen sowie des Integrierten Wasserressourcenmanagements will das UFZ seinen Beitrag leisten, das seit 2010 erklärte Menschenrecht auf Wasser umzusetzen.

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ
Permoserstraße 15 · 04318 Leipzig
Presse- und Öffentlichkeitsarbeit: Telefon: 0341/235-1269 · e-mail: info@ufz.de
www.ufz.de

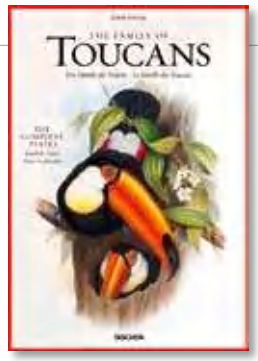
DIE HELMHOLTZ-GEMEINSCHAFT

Die Helmholtz-Gemeinschaft leistet Beiträge zur Lösung großer und drängender Fragen von Gesellschaft, Wissenschaft und Wirtschaft durch wissenschaftliche Spitzenleistungen in sechs Forschungsbereichen: Energie, Erde und Umwelt, Gesundheit, Schlüsseltechnologien, Struktur der Materie sowie Luftfahrt, Raumfahrt und Verkehr. Die Helmholtz-Gemeinschaft ist mit über 31.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern in 17 Forschungszentren und einem Jahresbudget von rund 3,3 Milliarden Euro die größte Wissenschaftsorganisation Deutschlands. Ihre Arbeit steht in der Tradition des großen Naturforschers Hermann von Helmholtz (1821-1894). **www.helmholtz.de**

UFZ-Standort Leipzig
in der Permoserstraße 15

UFZ-Standort Halle
in der Theodor-Lieser-Straße 4

UFZ-Standort Magdeburg
in der Brückstraße 3a



John Gould
The Family of Toucans / Die Familie der Tukane / La Famille des Toucans
The Complete Plates / Sämtliche Tafeln / Toutes les Planches
51 Tafeln im Format 34 mal 49 Zentimeter, dreisprachiges Beiheft (32 S.) im gleichen Format von Jonathan Elphick. Taschen, Köln 2011. € 74,99

ZOOLOGIE

Prachtvolle Großschnäbel

Eine klassische Sammlung von Zeichnungen der lateinamerikanischen Tukane ist neu aufgelegt worden.

Die schwere Box im Format eines Folianten ist etwas für hartgesottene Liebhaber. Es geht um die Tukane (Ramphastidae), jene großen lateinamerikanischen Tropenvögel mit dem überdimensionierten Schnabel. Der britische Naturforscher John Gould (1804–1881) erstellte von 1852 bis 1854 gemeinsam mit seinen Mitarbeitern 51 Lithografien für die zweite Ausgabe seines Werks über diese farbenprächtigen Vögel. Wer die ausdrucksvollen Darstellungen sieht, mag kaum glauben, dass Gould im Wesentlichen mit ausgestopften Präparaten gearbeitet und nur die wenigsten Tukane je lebend gesehen hat.

Gould gehörte zu den ersten Ornithologen und Tiermalern seiner Zeit. Ihm übergab Charles Darwin nach seiner Weltreise die Bälge seiner später so berühmten Galapagos- oder Darwinfinken zur Bestimmung, unsortiert und teilweise völlig falsch klassifiziert, denn Darwin selbst hielt seine Mitbringsel damals für wenig bedeutsam. Der Londoner Kurator Gould brauchte nur wenige Tage, um sie einer völlig neuen gemeinsamen Gruppe eng verwandter Arten zuzuordnen.

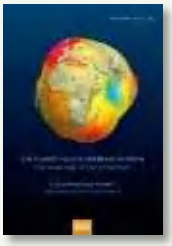
Zum Lebenswerk dieses Ausnahmeforschers gehören etliche umfassende, oft mehrbändige Werke über Vögel verschiedener Weltregionen, die er mit genauen, heute hoch gehandelten Bildern vorstellte. Eine erste Ausgabe des Tukane-Buchs erschien Mitte der 1830er Jahre. Für die umfangreichere zweite Ausgabe legte Gould sämtliche Darstellungen neu an. Er ordnete diese Vögel nun in 51 Arten, die er in Lebensgröße wiedergab. Die Tafeln maßen 55,9 mal 40,6 Zentimeter.

Die hier vorgestellten, zum Einrahmen gedachten Abdrucke sind ein wenig kleiner. Leider liegen die wissenschaftlichen Begleittexte Goulds nicht bei. Dafür gibt es einen informativen Übersichtstext von dem prominenten britischen Ornithologen Jonathan Elphick, der Goulds Werk historisch und aus heutiger Sicht beleuchtet.

Dort steht auch folgende Geschichte, die von den Indianern Brasiliens überliefert ist: Hockt ein Tukan in seiner Baumhöhle, so dass nur der Riesenschnabel zu sehen ist. Die anderen Vögel halten ihn für ein gewaltiges Tier und sind bereit, ihn als König zu akzeptieren. Als er dann herauskommt, rufen sie: »Er ist ja nichts als Nase!«

Adelheid Stahnke
Die Rezensentin ist Redakteurin bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Der Krauskopfarassari *(Pteroglossus beauharnaesii)* lebt im südwestlichen Amazonastiefland. Lebens- und Ernährungsweise sind noch weit gehend unbekannt.



Reinhard F. J. Hüttl (Hg.)

***Ein Planet voller Überraschungen.** Neue Einblicke in das System Erde*

***Our Surprising Planet.** New Insights into System Earth*

Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2011. 320 S., € 49,95

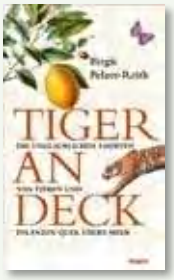
Im Vorwort schreibt der wissenschaftliche Vorstand des Deutschen GeoForschungsZentrums als Herausgeber, das Buch wolle keine Gesamtdarstellung unseres Planeten bieten, sondern über die neuesten Erkenntnisse aus allen Bereichen der Geowissenschaften informieren. Die Bescheidenheit ehrt, ist aber unangebracht. Der Band beschreibt ausführlich, aber ohne sich in ermüdende Details zu verlieren, das moderne geologische Weltbild und dessen Weiterentwicklung und Verfeinerung seit der plattentektonischen Revolution Mitte des 20. Jahrhunderts. Die Darstellung ist flüssig und laiengerecht. Allen mit Interesse am System Erde, einschließlich der brandaktuellen Aspekte Klimawandel und Geoenergie, ist das Buch deshalb wärmstens zu empfehlen. Kleines Bonbon: die mitgelieferte englische Fassung für besonders Eifrige. GERHARD TRAGESER

Volker Kitz, Manuel Tusch

Psycho? Logisch! Nützliche Erkenntnisse der Alltagspsychologie

Heyne, München 2011. 288 S., € 8,99

Häppchenweise bereitet das Buch altbekanntes Wissen zur Alltagspsychologie auf: beispielsweise, warum wir uns die Welt oft schönreden (kognitive Dissonanz als Bewältigungsstrategie) oder dass uns andere umso sympathischer sind, je mehr wir annehmen, dass sie uns mögen (reziproke Zuneigung). Oft sind konkrete Kochrezepte eingestreut. So lasse sich manche Ehe retten, indem man sich öfter in den Partner hineinversetzt. Und langweilige Tätigkeiten erschienen einem interessanter, wenn man sie mental in Unterkategorien aufteilt: also statt sich pauschal »Sport« vorzunehmen, lieber »Schwimmen«, »Joggen« und »Krafttraining« einplanen. Die Autoren empfehlen diesen Trick ausdrücklich auch zum Auffrischen des Sexuallebens. Nett, unterhaltsam, gut für den einen oder anderen Aha-Effekt, mit amüsanten Cartoons und knappem Glossar – aber eben doch nur eine unter den derzeit massenhaft verbreiteten Gebrauchsanleitungen für Menschen. HARTWIG HANSER



Birgit Pelzer-Reith

***Tiger an Deck.** Die unglaublichen Fahrten von Tieren und Pflanzen quer übers Meer*

mare, Hamburg 2011. 252 S., € 19,90

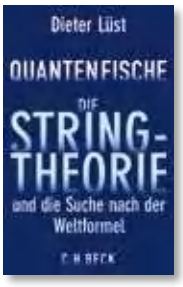
Karl der Große musste den Elefanten, den der Kalif Harun al-Raschid ihm geschenkt hatte, in Tunesien selbst mit einer Flotte abholen lassen – andere Schiffe fanden sich nicht. Große Zirkusunternehmen verschifften im 19. Jahrhundert ganze Menagerien samt Giraffen und Tigern nach Südamerika oder Japan. Unterhaltsam, spannend und detailreich schildert die Molekularbiologin Birgit Pelzer-Reith die oft atemberaubenden Seereisen von Tieren und Pflanzen: Um das chinesische Teemonopol zu unterlaufen, brachten britische Schiffe auf abenteuerliche Weise Samen und Setzlinge nach Indien. Der erste – geheime – Versuch, den Brotfruchtbaum von Tahiti als Sklavennahrung in die Karibik zu bringen, endete mit der Meuterei auf der »Bounty«. Der kleine, erfrischende Band liefert zugleich fast einen Abriss der Weltgeschichte, zumindest ihrer ökonomischen Seite. ADELHEID STAHNKE

Tom Bohn (Autor, Regisseur und Produzent)

***Reality XL.** Mystery-Thriller*

81 Minuten. Verleih: Indie-Stars; Kinostart: 12. Januar 2012

Heiner Lauterbach bringt das erste und einzige Integral dieses Films mit solch extremer geistiger Anstrengung zu Papier, dass man ihm keine Sekunde abnimmt, er könne als Quantenphysiker Konstantin Carus am Teilchenbeschleuniger LHC einen neuen Zusammenhang zwischen Energie und Materie, zwischen Gedanken und objektiver Wirklichkeit gefunden haben. Annika Blendl als sexy Polizistin, Max Tidof als distinguierter Staatsanwalt und Godehard Giese als absonderlicher Protokollführer, die ihn zum merkwürdigen Verschwinden seiner 23 Kollegen vernehmen, glauben das auch nicht. So bewegt sich dieses Kammerspiel suchend durch verschiedene Ebenen – oder Alternativen – der Wirklichkeit. Dem Zuschauer drängt sich allerdings der Eindruck auf: Die Quantenphysik kann nicht viel taugen. Denn auf seiner Ebene der Realität hält ihn die Langeweile fest im Griff. THILO KÖRKEL



Dieter Lüst

Quantenfische

Die Stringtheorie und die Suche nach der Weltformel

C.H.Beck, München 2011. 381 S., € 26,95

PHYSIK

Fischlein, blicke über deinen Teich hinaus!

Aus einem Märchen wird ein anspruchsvoller und trotzdem verständlicher Einblick in die Multiversen der Stringtheorie.

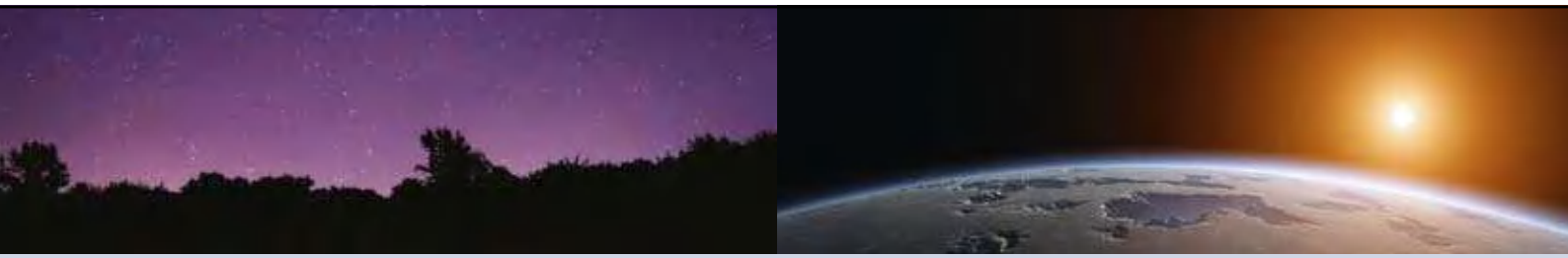
Seit einigen Jahren wird der Stringtheorie von vielen Autoren die Wissenschaftlichkeit abgesprochen. Dieter Lüst setzt dieser Kritik dreierlei entgegen: eine Unmenge an Fakten, die Geschichte vieler kleiner und großer Erfolge sowie pure Begeisterung für die Schönheit und Effektivität eines mathematischen Meisterwerks.

Der international bekannte Stringtheoretiker Lüst liebt sein Metier – das merkt man dem Buch an. Und er hat es sich zur Aufgabe gemacht, über die oft plakativen und banalen Überblicke anderer Sachbücher hinaus in die Tiefe zu gehen.

Nach einer Einführung in das Standardmodell der Elementarteilchen und einem kurzen Exkurs in Einsteins allgemeine Relativitätstheorie geht es zur Sache: Lüst quantisiert den Raum, bis es schäumt, bettet mehrdimensionale Branen in noch höherdimensionale Räume ein und blickt durch Tunnel in andere Universen. Am Ende lässt er es sich nicht nehmen, heterotische Stringtheorien, Venezianos Weltformel, Gruppentheorie und Eichsymmetrien, M-Theorie und neueste Entwicklungen wie Dimensionskompaktifizierung und Modulistabilisierung zu umreißen; worum es dabei geht, steht – nahezu formelfrei – im Buch.

Aber keine Panik: Lüst präsentiert diese Themenvielfalt in mundgerechten Häppchen. Jeder neue Gedanke erhält eine Zwischenüberschrift, so dass der Leser stets weiß, wo er sich befindet, und Luft holen kann – überaus nötig, denn zweifellos ist der Stoff anspruchsvoll.

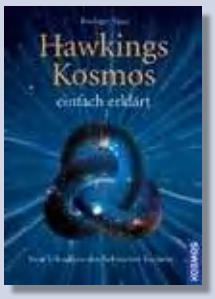
ANZEIGE



Neuerscheinungen im Kosmos-Verlag

Geheimnisvolles Universum: Lesen Sie über Stephen Hawkings wichtigste Beiträge zur Kosmologie oder lassen Sie sich von den atemberaubenden Bildern des Hubble-Weltraumteleskops begeistern!

Vom Urknall zu den Schwarzen Löchern



Wie ist der Kosmos entstanden? Öffnen Schwarze Löcher Wege in andere Universen? Stephen Hawking ist der berühmteste Wissenschaftler unserer Zeit. Aber was verbirgt sich hinter Hawkings Ideen? Rüdiger Vaas erklärt, worum es in Hawkings kosmologischen Forschungen wirklich geht. Mit einfachen Worten, begleitet von anschaulichen Illustrationen, beschreibt er Hawkings Erkenntnisse und verwegene Theorien leicht verständlich für jeden.

Rüdiger Vaas
Hawkings Kosmos einfach erklärt
224 Seiten, 73 Abb., €/D 24,95
ISBN 978-3-440-12853-4

Die schönsten Bilder aus dem All

Funkelnde Sternhaufen und majestätische Galaxien: Die Bilder des Hubble-Weltraumteleskops zeigen das Universum von seiner schönsten Seite. Seine kosmischen Porträts führen uns Geburt und Tod der Sterne vor Augen, sie dringen in das Herz ferner Galaxien vor und sind der mysteriösen Dunklen Materie auf der Spur. Leicht verständliche Begleittexte machen die dramatischen Vorgänge im Weltall greifbar und schildern die 20-jährige Geschichte des berühmtesten Teleskops unserer Zeit.

Giles Sparrow
Hubble
224 Seiten, 394 Abb., €/D 49,95
ISBN 978-3-440-12643-1

Weitere Infos unter: kosmos.de/astronomie

KOSMOS

Ein Fisch beobachtet mit dem Mikroskop, wie drei farbige Quantenfische mit einem mehrfarbigen Ball spielen und chamäleonartig beim Abwerfen und Auffangen die Farbe wechseln.

Seine besondere Färbung erhält das Buch über das bereits im Buchtitel angekündigte Märchen von den Quantenfischen, mit dem Lüst komplizierte Zusammenhänge zu veranschaulichen sucht. Inspiriert ist die Geschichte von den mehr als 10^{100} Lösungen der Gleichungen der Stringtheorie, die jede als eigenes Universum interpretiert werden – eine schier unfassliche Vielfalt, von der wir Menschen im Alltag nichts bemerken.

So geht es auch den Quantenfischen: Zunächst fixiert auf den eigenen Teich, der sehr genau die Eigeschaften aufweist, die ihre eigene Existenz möglich machen, beginnen sie zunehmend, über ihren Teich hinauszudenken. Im Lauf ihrer Nachforschungen erreichen sie die eine hinreichend umfassende Perspektive, aus der sie erkennen, dass vor ihnen ein Land voller Teiche liegt: ein Multiversum von Fischteichen. Von dieser Warte aus wundert es sie nicht länger, dass die Bedingungen im eigenen Teich gerade so passend für Leben waren – wären sie es nicht gewesen, so hätten sich die Quantenfische in einem anderen Teich wiedergefunden. Dieses Argument, das »anthropische Prinzip«, diskutiert Lüst ebenso wie viele weitere Randthemen aus Philosophie und Gesellschaft.

Es gelingt dem Autor in außergewöhnlicher Weise, inhaltliche Tiefe mit anschaulichen Bildern zu verbinden. Der Mut, mit dem er als Physiker auch schwierige philosophische Themen aufgreift, verdient Respekt – auch wenn ich nicht in jedem Punkt zustimme. So halte ich die Existenz der Dunklen Energie nicht für zweifelsfrei nachgewiesen.

Leider ist das sehr ausführliche Einleitungskapitel nicht in gleicher Weise in Abschnitte unterteilt wie das restliche Buch. Dadurch wirkt es etwas schwerfällig oder gar abschreckend, vor allem weil es bereits die übergreifenden Gedanken enthält, die erst nach der Lektüre des Hauptteils zu verstehen sind. Lassen Sie lieber gleich das Märchen von den Quantenfische auf sich wirken, mit allen Fragen, die es zunächst aufwirft. Die freudigen Augenblicke der Erkenntnis kommen dann im weiteren Verlauf des Buchs. Zuletzt können Sie das Eingangskapitel und das Märchen mit anderen Augen noch einmal lesen – und in einem kleinen Märchen ein großes Theoriegebäude, die Geschichte seiner Entdeckung und die damit verbundene Hoffnung wiederfinden.

Für Leser, die mehr wissen wollen als nur oberflächliche Schlagwörter, die Geduld und Biss mitbringen und am Ende mit einem sehr weit reichenden populären Überblick über die Stringtheorie belohnt werden wollen: lesenswert!

Vera Spillner
Die Rezensentin ist Physikerin und promovierte Philosophin. Sie arbeitet als Lektorin beim Springer-Verlag in Heidelberg.

Gerhard Roth
Bildung braucht Persönlichkeit
Wie Lernen gelingt
Klett-Cotta, Stuttgart 2011. 355 S., € 19,95

NEUROWISSENSCHAFT

Hirnforschung und Lernpraxis

Gerhard Roth hat faszinierende Erkenntnisse mitzuteilen. Aber für die Schule geben sie bislang nichts Neues her.

Der Untertitel »Wie Lernen gelingt« ist etwas voreilig. Den Lehrenden gibt der renommierte Hirnforscher Gerhard Roth keine neuen Hilfen für ihre Arbeit an die Hand, räumt ihnen aber immerhin einen Platz an einem Diskussionstisch ein, an dem neben ihnen und seiner eigenen Profession auch die Hochschulpädagogen sitzen sollen.

Roth beginnt mit einer Klage über die heutigen Situation, nicht ohne Seitenhiebe auf die drei Träger des Bildungssystems: die Bildungspolitiker (fremdbestimmt, aktionistisch), die Hochschulpädagogen (praxisabstinent), denen er nicht verziehen hat, dass er ihnen während seines eigenen geisteswissenschaftlichen Studiums ausgeliefert war, und das große Heer der Lehrer, die sich im Unterricht »mehr oder weniger redlich abmühen«.

Schon richtig – die meisten Lehrer empfinden sowohl die pädagogische Hochschul- als auch die Referendarausbildung als nutzlos für ihren Berufsalltag. Aber was stattdessen jeder von ihnen für sich zu tun pflege, nämlich mit einem eigenen Konzept fürs Unterrichten »das Rad neu« zu erfinden und danach sein Klassenzimmer weit ge-

AcademiaNet

Das Rechercheportal für herausragende Wissenschaftlerinnen bietet:

:: Profile hochqualifizierter Akademikerinnen aller Fachrichtungen – ausgewählt von Vertretern renommierter deutscher Wissenschaftsorganisationen und Industrieverbände,
:: individuelle Suchmöglichkeiten nach Fachrichtungen, Arbeitsgebieten und weiteren Kriterien,
:: flankierende redaktionelle Beiträge zum Thema »Frauen in der Wissenschaft«,

kurz: einen einzigartigen Service für Entscheidungsträger aus Wissenschaft und Industrie ebenso wie für Journalisten und Veranstalter von Tagungen und Kongressen.

www.academia-net.de

»In Deutschland gibt es viele herausragende Wissenschaftlerinnen in allen Fachrichtungen. Sie bei ihrer weiteren Karriere zu unterstützen, ist ein wichtiges Anliegen. AcademiaNet bietet den Wissenschaftlerinnen die große Chance, ihre Kompetenzen noch besser und sichtbarer als bisher in den Wissenschaftsbetrieb einzubringen.«

Dr. Angela Merkel

Robert Bosch Stiftung

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Eine Initiative der Robert Bosch Stiftung
in Kooperation mit Spektrum der Wissenschaft

hend vor Blicken anderer abzuschotten, sei ebenso verfehlt. Es gebe nämlich sehr wohl von der Persönlichkeit des Lehrers unabhängige, »klar darstellbare psychologisch-neurobiologische Rahmenbedingungen für erfolgreichen Unterricht, die aber vielen Lehrern und vielen Hochschulpädagogen nicht bekannt sind«. Dies unter anderem auch deshalb, weil die stark hermeneutisch-geisteswissenschaftlich orientierte Hochschulpädagogik nur unzureichend bereit sei, sich den empirisch-experimentellen Zugängen aus der Psychologie und neuerdings eben auch der Neurobiologie zu öffnen.

Wo finden sich nun die feierlich angekündigten Fakten aus der modernen Neurowissenschaft? Nicht in Kapitel 1, das über eine feuilletonistische Plauderei mit trivialen Wahrheiten zur Aufgabe von Schule nicht hinauskommt. Das längste und interessanteste Kapitel 2 »Persönlichkeit« beginnt mit der alten Lehre der vier Temperamente und deren modernem Pendant, der Faktorenanalyse, mit der man in einem abstrakten Raum von Persönlichkeitsmerkmalen ein System aussagekräftiger Koordinaten einziehen kann. Es folgen Persönlichkeitskonzepte aus neurobiologischer Sicht.

Für einen Laien wie mich ist es faszinierend, dass man empirisch hirnanatomische Regionen (»Zentren«) ausmachen kann, die bestimmten physischen, psychischen und kognitiven Apekten der Persönlichkeit zugeordnet sind. Diese Zentren stehen miteinander durch Austausch verschiedener Botenstoffe (Transmitter) in Verbindung. Es gibt sogar regelrechte Kommunikationssysteme wie das Stressverarbeitungssystem, das Selbstberuhigungssystem und das Motivationssystem, die anatomischen Systemen im Körper wie Blutkreislauf oder Lymphsystem vergleichbar sind. Nur bleibt uns Roth eine Erklärung schuldig, wie die fünf Persönlichkeitstypen »stark neurotizistisch«, »leicht neurotizistisch«, »normal«, »leicht extravertiert« und »stark extravertiert«, die er am Schluss beschreibt, aus diesen Befunden herzuleiten sind.

Um das alles nachzuvollziehen, ist Durchhaltevermögen gefordert. Roth bombardiert den Leser über viele Seiten mit fremdwortreicher Hirnforscher-Fachsprache. Da muss man viel Halbverstandenes seitenlang mitschleppen, bis sich schließlich der Nebel ein bisschen lichtet. Die Auslagerung eines Teils in den Anhang 1 hilft da nicht wirklich. Angenehmer wird es erst am Schluss des Kapitels bei den interessanten Forschungsergebnissen zur frühkindlichen Entwicklung.

> Merke: Auch der Leser ist ein Mensch, der gern **hirngerecht behandelt** werden möchte!

Die Kapitel 3 bis 11 bieten ein ähnliches Bild: faszinierende Erkenntnisse zu Themen wie Emotionen und Motivation, Lernen und Gedächtnis, Aufmerksamkeit, Bewusstsein und Intelligenz, deren Vernetzung untereinander und mit dem schulischen und beruflichen Erfolg, Sprache, Bedeutung und Verstehen, aber immer wieder durchsetzt mit gnadenlosen Attacken von Hirnforscherlatein. Auch der Leser ist ein Mensch, der gern hirngerecht behandelt werden möchte!

Über die Forschungsmethoden der modernen Neurowissenschaftler findet sich kaum etwas. Immerhin sagt Roth auf Seite 232/233, dass ein Hirnforscher bei der Interpretation der empirischen Daten auch hermeneutische Methoden benutzt, und zwar umso mehr, je komplexer die Sachverhalte sind. Das ist bemerkenswert ehrlich und erstaunlich zugleich, stellt doch Roth ansonsten seine eigene empirisch arbeitende Wissenschaft als der hermeneutischen Methode der Geisteswissenschaften überlegen dar.

In Kapitel 12 will Roth Konsequenzen für den Schulalltag ziehen. Da in der Schule fast nichts durch Empirie belegt sei, nimmt er für sich »Narrenfreiheit« in Anspruch und nutzt sie für eine lange Liste von Forderungen an Schule und Lehrer, vom Trivialen (»Schüler sollen lernen, nachzugeben, Herausforderungen anzunehmen, große Aufgaben in kleine zu zerlegen«) bis zum Surrealen (»Der Schüler sollte jeden Tag die Möglichkeit der persönlichen Aussprache haben. An diese soll sich eine halbstündige Aussprache des Klassenlehrers mit der Klasse anschließen«).

Die Textgestaltung lässt zu wünschen übrig: Die Absatzuntergliederungen passen oft nicht zum Inhalt. Querverweise ohne Seitenangabe (»siehe Anhang 1«) lassen den Leser lange blättern und suchen, gerade wenn es um wissenschaftliche Fachtermini geht. Einige Abschnitte scheinen zu fehlen; so vermisst man auf Seite 49 die vier zum Charakter gehörenden Grundmerkmale. Andererseits gibt es viele ermüdende Wiederholungen.

Die Mischung aus anspruchsvollem Hirnforscher-Fachbuch und bekanntem Wissen aus der Schule spiegelt wohl den Stand der Wissenschaft wider: Die Ergebnisse der Hirnforschung sind faszinierend, aber zur Praxis der Kunst des Erziehens haben sie noch nichts Neues zu sagen. Das sieht im Prinzip auch der Autor so.

Ob sich das in Zukunft ändern wird, bleibt offen. Einstweilen bleibt Erziehung eine glückliche oder unglückliche Beziehungskiste zwischen eher zufällig aufeinandertreffenden Persönlichkeiten, netten oder zickigen, guten oder bösen, begeisternden oder enttäuschenden, ausgeruhten oder überlasteten, fleißigen oder faulen ...

Wilhelm Sternemann

Der Rezensent ist Diplommathematiker. Bis zu seiner Pensionierung im Sommer 2011 war er Lehrer, die letzten 30 Jahre am Gymnasium Canisianum in Lüdinghausen.

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

Spektrum.de

Wir können Wissenschaft nicht einfacher machen – aber transparenter.

Werden auch Sie Fan von Spektrum auf Facebook www.facebook.com/spektrumverlag

Spektrum DER WISSENSCHAFT VERLAG

Prothese für Gelähmte

»Dr. Vernon L. Nickel hat zusammen mit dem Physiker J. L. Mc Kibben für an Muskellähmung leidende Patienten eine Vorrichtung geschaffen, um wieder Bewegungen auszuführen. Der ›künstliche Muskel‹ besteht aus einem Gummischlauch mit einem Ueberzug aus einem Nylongewebe. Durch Aufblähen des Schlauches verkürzt sich der ›Muskel‹ und übt einen mechanischen Zug aus, dessen Stärke von dem Druck abhängt.« (*McKibben-Muskeln werden für Prothesen und in der Robotik eingesetzt. Die Red.*) Neuheiten und Erfindungen 316, Januar 1962, S. 6

Ringplanet Jupiter

1962

»Daß auch Jupiter einen Ring hat, ist nicht abzuweisen. Der Direktor der Sternwarte Kiew hat ermittelt, daß das Äquatorband seine Lage gerade so wechselt, wie man es von einem Ringschatten erwarten müßte: Steht die Sonne südlich der Äquatorebene, so liegt das Band auf der Nordhemisphäre – und umgekehrt.« *(Jupiters Ringsystem wurde 1979 auf Bildern der Raumsonde Voyager 1 entdeckt. Die Red.)* Naturwissenschaftliche Rundschau, Januar 1962, Nr. 1, S. 28

Indianergräber in Nahant, Massachusetts

Archäologie im Garten

»Ende Juli 1961 wurde bei Kanalisationsarbeiten ein indianisches Gräberfeld aufgedeckt. Eine Besichtigung ergab, daß die Beisetzungen im Hausgarten des Mr. John Knudsen aufgedeckt worden waren. Da alle 3 Skelette von Männern stammen, erhebt sich die Frage, wohin die Indianer die übrigen Familienmitglieder geschafft haben könnten. Vielleicht findet sich jenseits des Gartenzaunes, beim Nachbarn, die Antwort.« Kosmos, Januar 1962, Nr. 1, S. 3

1912

Geschwindigkeitsrausch in Bayern

»Der deutsche Schnelligkeitsrekord, der bisher fast ausschließlich im Bereich der preussischen Staatsbahnen anzutreffen war, ist auf die bayerischen Staatsbahnen übergegangen. Zum 1. Mai 1911 wurde nämlich der bayerische Zug D 39 München-Nürnberg zunächst derart beschleunigt, dass er für diese 199 km lange Strecke nur noch 138 Minuten brauchte. Zum 1. Juni wurde ein Vorzug eingelegt. So beträgt beider Züge Fahrzeit heute nur noch je 135 Minuten, was nicht weniger als 88,3 km/Std. entspricht.« Die Welt der Technik, Januar 1912, Nr. 2, S. 38

Schlafende Fische

»Man spricht von einer Art Winterschlaf der Karpfen, die während der kalten Jahreszeit unbeweglich sind und abnehmen. Da noch nicht festgestellt ist, ob es sich hier um eine periodische Lebenserscheinung oder um eine Wirkung der Temperatur handle, hat der Italiener Felice Supino eine Versuchsreihe an 12 Karpfen ausgeführt. Fische, die bei einer Temperatur von etwa 14° gehalten wurden, haben Nahrung zu sich genommen. Die im Freien gehalten wurden, gleichfalls, solange die Temperatur höher als 7° war. Wenn sie aber unter diesen Wert sank, so hörte die Nahrungsaufnahme auf und das Gewicht nahm ab.« Die Umschau in Wissenschaft und Technik, Januar 1912, Nr. 1, S. 18

Künstliche Künstler

»Nicht nur in der Industrie verliert die Rolle der Menschenhand mehr und mehr an Bedeutung, auch in das Gebiet der Kunst fangen maschinelle Vorrichtungen an einzudringen. Der von E. F. Ostrowsky in Berlin erfundene Apparat gestattet die mechanische Wiedergabe aller wichtigen Merkmale eines Modells in weicher Masse, wie Ton oder Wachs. Der Apparat enthält mehrere verstellbare Schablonen. Wenn man dann die Enden der auf das Profil eingestellten Stäbchen in Ton oder Wachs eindrückt, so erhält man eine Reihe von Orientierungspunkten und kann auch in Abwesenheit des Modells fortwährende Kontrollvergleiche vornehmen.« Prometheus 1158, Januar 1912, S. 223

Ansetzen des Apparats an einen Kopf

FOTOS AUS ZEITSCHRIFTEN DER FORSCHUNGSBIBLIOTHEK FÜR WISSENSCHAFTS- UND TECHNIKGESCHICHTE DES DEUTSCHEN MUSEUMS

Silberzauber – die Anfänge der Fotografie

Ein Holzkasten in der Art der Camera obscura genügte den ersten Fotografen – die eigentliche Erfindung Louis Daguerres betraf das lichtempfindliche Material: eine mit Silberjodid beschichtete Kupferplatte. Jede Aufnahme war ein Unikat, die erhaltenen Exemplare sind rare Sammlerstücke. Das gilt auch für die abgebildete Kamera der Firma Giroux von 1839: Sie ist bis heute die einzige erhaltene, originale Daguerre-Kamera in Deutschland. Rechts oben die Daguerreotypie einer jungen Frau, Anton Edler, München, um 1848

BEIDE FOTOS: DEUTSCHES MUSEUM

Am 19. August 1839 machte die französische Regierung »in edelmütiger Weise der ganzen Welt« ein Geschenk: Auf Anregung des renommierten Physikers François Arago hatte sie die Rechte für das erste marktreife Verfahren der Bildaufzeichnung erworben und gab es jedermann zur Nutzung frei. Den Erfinder Louis Jacques Mandé Daguerre (1787 – 1851) ehrte sie mit einer lebenslangen Rente. Dies war die Geburtsstunde der Fotografie.

Daguerre war zugleich Tüftler und Geschäftsmann. Seit 1822 betrieb er ein Lichttheater in Paris, in dem er durch Beleuchtung magische Effekte auf bemalten Leinwänden erzeugte. Um Landschaftsmotive festzuhalten, ohne zu zeichnen, entwickelte er ein Verfahren zur automatischen Bildspeicherung. Doch obwohl Belichtungen selbst bei starker Beleuchtung mindestens drei Minuten dauerten, konnten dies den Siegeszug der »Daguerreotypie«nicht aufhalten.

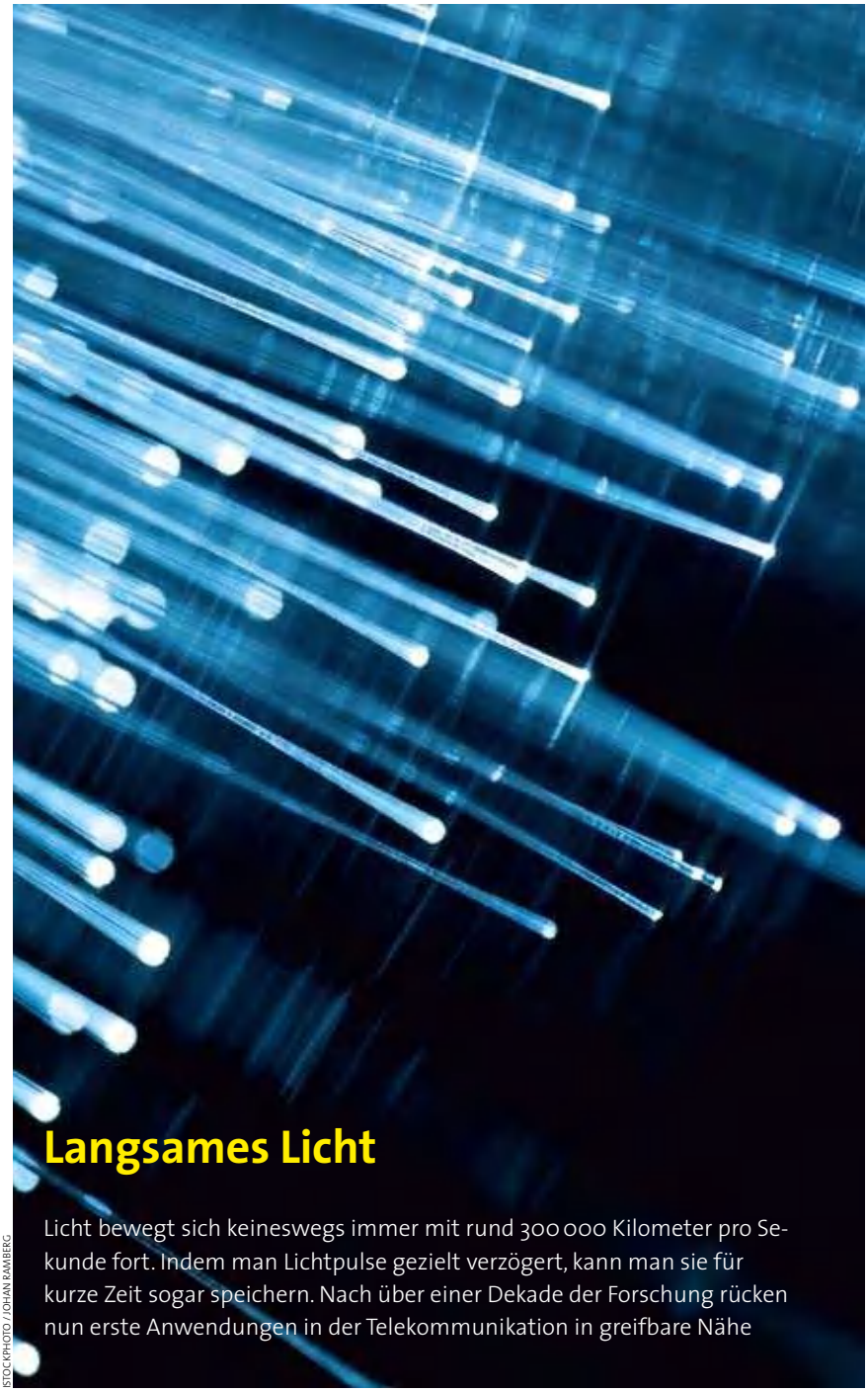
Allerdings eignete sich die Technik kaum für Amateure – dazu war sie zu aufwändig und kostspielig. Als Bildträger dienten versilberte Kupferplatten, die der Fotograf mit Jod bedampfte. Dabei entstand Silberjodid, das bei ausreichender Belichtung wieder zerfiel. Dementsprechend vorsichtig musste er mit der Platte umgehen – erst bei der Aufnahme durfte Licht auf sie treffen. Im Fotolabor setzte er sie anschließend heißem Quecksilberdampf aus, der mit dem Silber in den belichteten Partien eine weißliche Legierung bildete. Übriges Jodid wurde zuletzt mit einer Salzlösung ausgewaschen. Um die Aufnahmen vor Beschädigung zu schützen, wurden sie anschließend verglast.

Zeitgleich zur Markteinführung des Verfahrens brachte Daguerre eine von Alphonse Giroux hergestellte Kamera heraus (siehe großes Bild oben), die auf der als technische Zeichenhilfe bekannten Camera obscura beruhte. In den großen, mit einer Monokellinse ausgestatteten Holzkasten des »Daguerreotype« war ein zweiter Kasten eingesetzt, der auf einem Laufboden verschoben wurde, um das auf einer Mattscheibe sichtbare Bild scharf zu stellen. Vor der Aufnahme tauschte der Fotograf diese gegen eine Kassette mit der versilberten Kupferplatte aus.

Daguerreotypien waren Unikate – Abzüge ließen sich also nicht davon herstellen – und gaben das Abzubildende zudem seitenverkehrt wieder. Überdies erschienen die Aufnahmen abhängig vom Blickwinkel als Negativ oder Positiv, je nachdem ob sich in den silbernen Flächen Lichter oder Schatten der Umgebung spiegelten. Neben diesen praktischen und ästhetischen Problemen erwies sich die Methode allerdings auch als höchst ungesund, mussten sich die Fotografen doch immer wieder giftigen Quecksilberdämpfen aussetzen.

Trotz all dieser Nachteile übertraf das Verfahren durch seine äußerst detailreiche Wiedergabe konkurrierende Entwicklungen, wie etwa die Negativ-Positiv-Technik des englischen Gelehrten William Henry Fox Talbot. Erst als das Negativ um 1850 nicht mehr auf grobkörnigem Papier, sondern auf Glas festgehalten wurde, setzte sich dessen Methode durch.

Die promovierte Kunsthistorikerin **Cornelia Kemp** ist Kuratorin der Abteilung »Foto und Film« am Deutschen Museum in München.



ISTOCKPHOTO / JOHAN RAMBERG

Langsames Licht

Licht bewegt sich keineswegs immer mit rund 300 000 Kilometer pro Sekunde fort. Indem man Lichtpulse gezielt verzögert, kann man sie für kurze Zeit sogar speichern. Nach über einer Dekade der Forschung rücken nun erste Anwendungen in der Telekommunikation in greifbare Nähe

FOTOLIA / NATALYA IVANIA

Das menschliche Auge – ein Organ mit langer Vergangenheit

Unser Augentyp existierte schon vor mehr als 500 Millionen Jahren, bei ganz frühen Wirbeltieren. Wie er entstand, erkannten Forscher an anatomischen und genetischen Vergleichen mit Neunaugen und Schleimaalen

VATTENFALL EUROPE AG

Energie aus Wasser

Der dritte Teil unserer Serie »Die Zukunft der Energie« dreht sich um die Wasserkraft. Während zu Lande erst ein Viertel des Potenzials erschlossen ist, blicken Forscher und Ingenieure schon auf ein ganz neues Reservoir: die Weltmeere

Indianische Sklavenhalter

Um als Farmer in der Welt der Südstaaten zu bestehen, folgten Indianer der Cherokee-Nation Ende des 18. Jahrhunderts dem Vorbild der Weißen: Sie setzten afrikanische Sklaven ein – und übernahmen rassistische Vorurteile

Quasipseudozufallszahlen

Zufallszahlen, die ein Computer erzeugt, sind nie wirklich zufällig; denn sie werden mit einem streng deterministischen Algorithmus errechnet. Paradoxerweise eignen sich solche Pseudozufallszahlen für manche Zwecke besser, wenn sie den echten Zufall nicht gar so perfekt nachmachen!

NEWSLETTER

Möchten Sie regelmäßig über die Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?

Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:
www.spektrum.com/newsletter

Spektrum DER WISSENSCHAFT

ERDE 3.0

Wasserkraft: Unerschlossenes Reservoir in den Weltmeeren

FEBRUAR 2012

Spektrum DER WISSENSCHAFT 2/12

EVOLUTION
Das Auge – Organ mit Vergangenheit

STOCHASTIK
Spiel mit Zufallszahlen

RAFFINIERTER KILLER
Die tödlichen Tricks der Fühlerschlange

DATENNETZE

Der Licht-Turbo

Mehr Tempo durch gespeicherte optische Pulse

7,90 € (D/A) · 8,50 € (L) · 14,– sFr.
D6179E

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

www.spektrum.de

Carsten Könneker
Chefredakteur
koenneker@spektrum.com

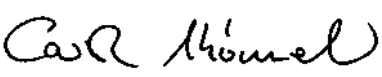
Wider alle Abgeschlossenheitsrhetorik!

Im Dezember 2011 meldeten Physiker des CERN, Hinweise auf die Existenz des Higgs-Bosons gefunden zu haben. Das lange gesuchte Elementarteilchen könnte eine Masse von etwa 125 Gigaelektronvolt haben; allerdings müsse der Befund noch weiter erhärtet werden. Etwas Großes liegt in der Luft. Denn sollte es den Forschern gelingen, das von Peter Higgs und anderen Physikern vor rund einem halben Jahrhundert vorhergesagte Partikel wirklich dingfest zu machen, wäre damit das Standardmodell der Elementarteilchen komplettiert, der letzte noch fehlende Baustein gefunden. Theorie und Empirie befänden sich im Einklang – die vermeintlich exakteste aller Naturwissenschaften hätte ihrem Ruf alle Ehre gemacht.

Dennoch sollten wir uns nicht zu sehr in Vollständigkeitsrethorik ergehen. Denn wie »abgeschlossen« ist die Physik wirklich? Selbst dann, wenn wir demnächst mit dem Higgs-Boson ein sehr wichtiges Puzzleteilchen in das Bild der Physik einfügen könnten – die Metapher des fertigen Theoriekomplexes ist irreführend. Ja, sie verrät mehr über das Wunschdenken von Wissenschaftlern als über die Realität der Natur. So sieht es der in Princeton lehrende Physiker Tony Rothman. In seinem Essay ab S. 61 vergleicht er das Werkeln seiner Zunft am eigenen Theoriegebäude mit einem modernen Turmbau zu Babel. Die Physik ähnele dabei einer »heruntergekommenen Struktur aus isolierten Modellen, die durch schiefe Erklärungen notdürftig miteinander verbunden sind, kurz einer Monstrosität, die himmelwärts taumelt«. Ganz Wissenschaftler, belegt der kritische Geist diese starken Worte mit Beispielen für zentrale, unbeantwortete Fragen seines Fachs: Warum kennt von allen fundamentalen Gesetzen der Physik nur der zweite Hauptsatz der Thermodynamik eine Zeitrichtung? Welchen Sinn haben unendliche Kräfte, die in manchen Teildisziplinen auftauchen? Wie kann ein Quantensystem, das durch die deterministische Schrödingergleichung exakt beschrieben wird, im Moment der Messung urplötzlich probabilistisch werden? Und weshalb können wir nur für die wenigsten physikalischen Probleme exakte Lösungen anbieten?

Wissenschaftler tun gut daran, die Schwachstellen der eigenen Theorien offen zu benennen – egal, ob sie Biologen, Neuroforscher, Chemiker oder Physiker sind. Was Rothman betreibt, ist keine Nestbeschmutzung; er warnt vor Hybris. Wenn 2012 womöglich Erfolgsmeldungen über die »Komplettierung« des physikalischen Weltbilds durch die Medien schallen, sollten wir uns daran erinnern!

Herzlich Ihr



AUTOREN IN DIESEM HEFT

Der Biologe **Kenneth C. Catania** von der Vanderbilt University in Nashville (Tennessee) stellt die raffinierte Fangmethode der Fühlerschlange vor: Sie nutzt den Fluchtreflex von Fischen aus (S. 30).

Der Neuropsychologe **Reinhard Werth** von der Ludwig-Maximilians-Universität München zeigt, dass Aufmerksamkeit kein einheitliches Phänomen ist. Vielmehr setzt es sich aus mehreren voneinander unabhängigen Teilleistungen zusammen (S. 36).

Luc Thévenaz von der École Polytechnique Fédérale de Lausanne und **Thomas Schneider** von der Leipziger Hochschule für Telekommunikation erforschen, wie sich Lichtsignale speichern lassen, um damit höhere Übertragungsraten in Datennetzen zu erzielen (S. 48).

22 Evolution des Auges

36 Rätsel Aufmerksamkeit

74 Wasserkraft für die Zukunft

42 Krebs beim Beutelteufel

BIOLOGIE & MEDIZIN

▸ **22 Das Auge – Organ mit Vergangenheit**
Trevor D. Lamb
Schon vor 500 Millionen Jahren entstand das Wirbeltierauge

▸ **30 Die Tricks der Fühlerschlange**
Kenneth C. Catania
Eine kleine Wasserschlange nutzt raffinierte Fangtechniken

36 Die vielen Fassetten der Aufmerksamkeit
Reinhard Werth
Unterschiedlichste Teilleistungen ergeben ein faszinierendes Puzzle

42 Teuflische Krankheit
Menna E. Jones, Hamish McCallum
Eine ansteckende Krebserkrankung droht den Tasmanischen Teufel auszurotten

PHYSIK & ASTRONOMIE

TITELTHEMA

▸ **48 Der Licht-Turbo**
Luc Thévenaz, Thomas Schneider
Forscher verlangsamen Licht und speichern sogar Lichtpulse. Das könnte mehr Tempo für unsere Datennetze bringen

61 Die Physik – ein baufälliger Turm von Babel
Tony Rothman
Die Physik hat ein gewaltiges Theoriegebäude errichtet, das unsere Welt erklären soll. Doch selbst in den unteren Stockwerken klaffen noch gewaltige Risse

SCHLICHTING!

66 Kunst in der Physik
H. Joachim Schlichting
Es braucht nicht viel, damit eine glatte Flüssigkeitsoberfläche schöne Muster hervorbringt

MENSCH & KULTUR

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

68 Kollektive Verklemmung und das gehörnte Oktaeder
Christoph Pöppe
Schon die Griechen der Antike hätten sie finden können: lückenlose Füllungen des Raums durch regelmäßige Körper verschiedener Kantenlänge. Aber entdeckt wurden sie erst kürzlich – von Materialforschern

Titelmotiv: iStockphoto / Mark Wragg

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▸ gekennzeichnet

48
TITELTHEMA

Der Licht-Turbo

Mehr Tempo für Datennetze durch gespeicherte optische Pulse

ERDE & UMWELT

SERIE: DIE ZUKUNFT DER ENERGIE

ERDE 3.0

▸ **74 Die unerschöpfliche Kraft des Wassers**
Robert Gast
Wir nutzen erst ein Viertel des weltweiten Potenzials der Wasserkraft. Zunehmend attraktiv wird die Energie der Weltmeere

INTERVIEW

78 »Noch ist Meeresenergie ein Abenteuer«
Kai-Uwe Graw über die Erschließung der Wellenenergie

84 Ringwallspeicher für die Energiewende
Matthias Popp
Gute Standorte für Pumpspeicher sind rar. Doch es gibt eine Alternative: Ringwallspeicher

TECHNIK & COMPUTER

▸ **88 Spiel mit dem Zufall**
Brian Hayes
Zufallszahlen sind für vielerlei gut – etwa dazu, den Flächeninhalt kompliziert geformter Figuren zu ermitteln. Meist müssen sie aber gar nicht wirklich zufällig sein, sondern nur so aussehen. Manchmal funktionieren sogar schlechte Imitate am besten

Nach S. 94 folgt eine 20-seitige Sonderpublikation der Forschungsallianz Kulturerbe: ***Dem Zahn der Zeit zum Trotz***

SPEKTROGRAMM

8 Kälteste Temperatur flüssigen Wassers ermittelt • Hochseefischerei vor 42 000 Jahren • Schwarze Löcher mit Rekordmassen • Dopamin gegen Tumoren • Altruistische Ratten • »Sprachgen« hilft beim Lernen

BILD DES MONATS

11 Elektronen-Assel

FORSCHUNG AKTUELL

12 Sterne mit Raumtemperatur
Neu entdeckte Braune Zwerge sind überraschend kühl

14 Sinnvolle Selbstüberschätzung
Die evolutionären Vorteile einer zu hohen Meinung von sich selbst

16 Innenleben des Seidenfadens
Hauchdünn und dennoch reißfest: Computersimulationen erklären die Eigenschaften der Spinnenseide

18 Leuchtende Quantenmagnete
Fein aufgelöste Spin-Information jenseits der Beugungsgrenze

20 Springers Einwürfe
Unwissen schadet nicht

WEITERE RUBRIKEN

3 Editorial

6 Leserbriefe/Impressum

95 Rezensionen
Walter Lewin: Es funktioniert!
Marcel Robischon: Planet der Insekten
Tobias Hürter: Du bist, was du schläfst
u. a.

100 Wissenschaft im Rückblick
Von der Dampfmaschine zur Weltraumstation

101 Exponat des Monats
Das Saitengalvanometer und die Geburt der Elektrokardiografie

102 Vorschau

SOLAR JUNCTION

Weltrekord in der Fotovoltaik: CPV-Zellen fokussieren das Sonnenlicht um das 400-Fache und erzielen damit Wirkungsgrade von über 40 Prozent.

Wirkungsgrad der Fotovoltaik

Bernd Müller stellte Chancen und Herausforderungen einer zukünftigen Energieversorgung per Sonnenlicht vor. (»Die Zukunft der Energie, Teil 1: Sonnige Zeiten«, Dezember 2011, S. 68)

Alois Bitterli, Wiezikon (Schweiz): Die erreichten Fotovoltaik-Wirkungsgrade von CPV-Zellen sind beeindruckend, aber für eine Hausdach-PV-Anlage sind diese wegen den benötigten Lichtkonzentratoren wohl kaum einsetzbar. Darum meine Frage: Welche maximalen Wirkungsgrade von PV-Zellen, die für eine Hausdachinstallation geeignet wären, sind heute im Labor schon erreicht worden?

Antwort des Autors Bernd Müller: Das kann man so pauschal nicht sagen, weil man nicht leicht abgrenzen kann, was für ein Hausdach geeignet ist und was nicht. Die höchsten Wirkungsgrade erreichen derzeit monokristalline Siliziumzellen. Sie kommen in der Serienfertigung auf etwa 18 und im Labor auf 25 Prozent. Polykristalline, amorphe und Dünnschichtsolarzellen liegen darunter. In dem Markt ist aber vieles in Bewegung. Ich gehe davon aus, dass Mehrschichtsolarzellen irgendwann auch auf Hausdächer gebaut werden (Konzentratorzellen eher nicht, weil die der Sonne nachgeführt werden). Das ist aber weniger ein technisches Problem als eine Frage der Kosten.

Plädoyer für solide, langfristige Politik

Wegen des ungelösten Endlagerproblems befürwortete Michael Springer den Ausstieg aus der Kernenergie. (»Lehren aus Fukushima«, Oktober 2011, S. 20)

Otto Schult, Jülich: Der Auffassung, dass abgebrannte Brennelemente als separates Sicherheitsproblem erkannt werden müssen, stimme ich zu. Aus diesem Grund bin ich seit Jahrzehnten gegen Wiederaufarbeitung und Endlagerung, weil die Zeit dafür noch nicht reif ist. Radioaktiver Abfall, wobei es sich eigentlich um Wertstoff handelt, bedarf wegen der Strahlung besonders sorgfältiger Handhabung. Dazu ist es sinnvoll, abzuwarten, bis der Fortschritt uns die Werkzeuge an die Hand gibt, um die radioaktiven Substanzen optimal zu verarbeiten. Bis dahin muss man die nicht benötigten radioaktiven Substanzen reversibel und somit kontrollierbar zwischenlagern.

Der von unserer Regierung beschlossene kurzfristige Kernenergieausstieg ist falsch. Er ist antieuropäisch und widerspricht der globalen Energiestrategie. Dass der Ausstieg aus der Kernenergie langfristig richtig ist – und zwar global –, wird jedem klar, der sich im Internet darüber informiert, wie lange wir auf Öl, Gas und Kohle oder eben auch Kernenergie zurückgreifen können, um unseren weltweiten Energiebedarf zu decken. Über mehr als 1000 Jahre betrachtet, haben wir nur Wasser, Wind und Sonne zur Verfügung. Kurzfristig

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.)
Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser (Monatshefte), Dr. Gerhard Trageser (Sonderhefte)
Redaktion: Thilo Körkel (Online-Koordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke
E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Editor-at-Large: Dr. Reinhard Breuer
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Redaktionsassistenz: Anja Albat-Nollau, Britta Feuerstein
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114
Verlagsleiter: Richard Zinken
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Christian Hammer, Dr. Rainer Kayser, Dr. Andreas Nestke, Dr. Sebastian Vogel
Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 7,90 (D/A) / € 8,50 (L) /sFr. 14,–; im Abonnement € 84,– für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Die Preise beinhalten € 8,40 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 8,40 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e.V. erhalten SdW zum Vorzugspreis.
Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Marianne Dölz; Anzeigenleitung: Marco Buch, Tel. 0211 887-2483, Fax 0211 887 97-2483; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Hamburg: Matthias Meißner, Brandstwiete 1, 6. OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-210, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: Matthias O. Hütköper, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2053, Fax 0211 887-2099; Frankfurt: Thomas Wolter, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 2424-4507, Fax 069 2424-4555; München: Jörg Bönsch, Nymphenburger Straße 14, 80335 München, Tel. 089 545907-18, Fax 089 545907-24; Kundenbetreuung Branchenteams: Tel. 0211 887-3355, branchenbetreuung@iqm.de
Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 33 vom 01.01. 2012.
Gesamtherstellung: L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2012 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.
Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
75 Varick Street, New York, NY 10013-1917
Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven Inchcoombe, Vice President, Operations and Administration: Frances Newburg, Vice President, Finance, and Business Development: Michael Florek, Managing Director, Consumer Marketing: Christian Dorbandt, Vice President and Publisher: Bruce Brandfon

Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

PRESSE Fachhandel

falsch war auch die massive Subvention von Fotozellen auf unseren Dächern und sogar Feldern. Bei uns scheint die Sonne nicht so intensiv wie in südlichen Ländern. Offenbar geschieht der Aufbau von Offshore-Windenergieanlagen ebenfalls überhastet, was Pannen beweisen. Solide Forschung und Entwicklung aus Steuermitteln und nicht durch Zwangsbeglückung des Stromverbrauchers sind die richtige Politik. Solide Politik beansprucht Zeit, die verfügbar ist, globales Denken und weltweite Kooperation.

Populationsdichten beeinflussen Biodiversität

Der Meeresforscher Craig R. McClain berichtete über das komplexe Ökosystem am Boden der Tiefsee. (»Üppige Vielfalt trotz Nahrungsmangel«, November 2011, S. 68)

Detlef Schroedter, Hamburg: Vor einigen Jahren habe ich in »Spektrum der Wissenschaft« einen Artikel gelesen, der sich mit Artenvielfalt und Populationsdichte beschäftigte. Es wurde da die »Bio«-Diversität mit Computerprogrammen getestet, indem virtuelle Populationen verschiedener Dichte und genetischer Variabilität unterschiedlichem Nahrungsangebot ausgesetzt wurden.

Das Ergebnis deckte sich mit den Aussagen des Artikels, womit die Auflistung von Tiefsee-, Land- und Süßwasserhabitaten getrost um digitale Habitate erweitert werden kann: Sehr große Populationen sind ebenso wie sehr kleine der Artenvielfalt hinderlich.

Bei einer kleinen Population drängt sich das Risiko eines raschen Aussterbens von Arten als Erklärung auf. Bei sehr großen Populationen müssen sich vorteilhafte Mutationen gegen erheblich mehr »Konkurrenz« durchsetzen, und selbst günstige Mutationen können schnell einfach durch die schiere Übermacht der Konkurrenz wieder verdrängt werden – ein Phänomen, das man übrigens auch in der Evolution der Technik kennt (man denke nur an die Dominanz des VHS-Formats bei Videorekordern oder von Windows als Computerbetriebssystem).

So sind große Populationen zu träge für eine schnelle Artentwicklung, kleine zu wenig resistent gegenüber Unglücken, und die höchste Biodiversität findet sich bei gemäßigten Populationsdichten.

Theorie vor der Praxis

Für die Entdeckung der Quasikristalle bekam der israelische Physiker Dan Shechtman den Chemienobelpreis 2011. (»Kristalle mit unmöglicher Symmetrie«, Dezember 2011, S. 18)

Peter Kramer, Tübingen: Der Artikel beschreibt das Experiment, auf dessen Basis Dan Shechtman 1984 das unerwartete Diffraktionsmuster der ersten Quasikristalle publizierte, das ihm den Nobelpreis für Chemie 2011 eintrug. Entgegen Ihrem Bericht ist die von Shechtman publizierte atomare Ordnung nicht zehnzählig, sondern ikosaedrisch. Sie weist damit fünfzählige Symmetrie in sechs räumlichen Richtungen aus, die senkrecht zu den zwölf paarweise parallelen Seitenflächen eines regulären Dodekaeders verlaufen. Die sichtbare zehnzählige Symmetrie des Diffraktionsmusters entsteht erst durch die Zentrosymmetrie in der Streuung an der atomaren Struktur.

Laut Artikel publizierte P. J. Steinhardt in Kenntnis der Experimente von Shechtman zusammen mit D. Levine nach wenigen Wochen eine Erklärung der Diffraktionsspektren im gleichen »Journal Physical Review Letters«. Doch schon elf Monate vor den Publikationen von Shechtman und von Levine und Steinhardt hat eine im Fachmagazin »Acta Crystallographica« (40A), S. 580–587, publizierte Arbeit von P. Kramer und R. Neri die mathematische Grundlage für Shechtmans Entdeckung geschaffen. Dort werden die erwähnten sechs fünfzähligen Richtungsvektoren als ikosaedrische Projektionen aus sechs Richtungsvektoren des sechsdimensionalen kubischen Gitters nachgewiesen. Nach den Regeln der Kristallografie für dieses Gitter werden die Maxima der Diffraktion von Shechtmans ikosaedrischer Struktur bis heute durch je sechs ganze Zahlen bezeichnet. Auch die beiden von A. L. Mackay 1982 als Bausteine der ikosaedrischen Ordnung vorgeschlagene Rhomboeder werden von Kramer und Neri in Abbildung 6 ihrer Arbeit als Projektionen aus dem kubischen sechsdimensionalen Gitter erwiesen. Die Theorie wurde also vor dem Experiment gefunden und veröffentlicht.

Philip Zerner, Hannover: In Ihrem Artikel schreiben Sie, dass mit dem Oktaeder der Raum lückenlos gefüllt werden kann. Das ist nicht richtig. Im Fall des Oktaeders bleiben Lücken in Form eines Tetraeders übrig (siehe kubisch dichteste Kugelpackung).

FOLGEN SIE UNS IM INTERNET

facebook
www.spektrum.de/facebook

YouTube
www.spektrum.de/youtube

studiVZ
www.spektrum.de/studivz

twitter
www.spektrum.de/twitter

BRIEFE AN DIE REDAKTION

... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf www.spektrum.de/leserbriefe oder schreiben Sie mit Ihrer kompletten Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Leserbriefe
Sigrid Spies
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

Die vollständigen Leserbriefe und Antworten der Autoren finden Sie ebenfalls unter: www.spektrum.de/leserbriefe

PHYSIKALISCHE CHEMIE

Kälteste Temperatur flüssigen Wassers ermittelt

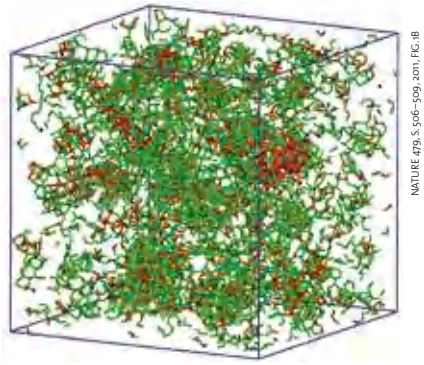
Wasser gefriert nicht zwangsläufig bei null Grad Celsius. Ohne größere Verunreinigungen, die als Kristallisationskeime dienen, kann es wesentlich weiter abkühlen, ohne zu erstarren. Die Chemikerinnen Valeria Molinero und Emily Moore von der University of Utah in Salt Lake City (USA) haben nun die Grenze entdeckt, unterhalb deren sich Wasser der Eisbildung nicht mehr entziehen kann: Bei minus 48 Grad Celsius verändert sich seine molekulare Struktur so, dass der Gefriervorgang zwangsläufig einsetzt.

Flüssiges Wasser ist ein Netzwerk aus H_2O-Molekülen, die lose über Wasserstoffbrücken miteinander verbunden sind. Beim Gefrieren bilden sich winzige Kerne aus kristallin angeordneten Molekülen. Sie können sich wieder auflösen, aber auch durch Anlagern weiterer H_2O-Gruppen wachsen. Überschreiten die kristallinen Strukturen eine bestimmte Größe, breiten sie sich über das gesamte Volumen aus. Meist erleichtern Kristallisationskeime wie Staubpartikel oder Erschütterungen die Eisbildung.

Den Forscherinnen zufolge erstarrt völlig reines Wasser bei minus 48 Grad Celsius auch ohne diese Hilfestellung. Dann ordnen sich die Moleküle vermehrt zu Tetraedern an, in denen jede H_2O-Gruppe lose mit vier weiteren verbunden ist. Das führt dazu, dass entstehende Eiskerne von Molekülensembles umgeben sind, deren Struktur zwischen flüssig und fest liegt. Die Tetraeder stabilisieren die winzigen Eiskerne, wodurch das Wasser schneller kristallisiert und letztlich unausweichlich gefriert.

Um die Vorgänge auf molekularer Ebene genau verfolgen zu können, mussten Molinero und Moore aber auf Computermodelle zurückgreifen. Denn unterhalb von minus 41 Grad Celsius kristallisiert Wasser zu schnell, als dass sich die verbliebenen flüssigen Anteile noch experimentell untersuchen ließen. In aufwändigen Simulationen berechneten die Forscherinnen das Verhalten einiger tausend Moleküle.

Nature 479, S. 506–509, 2011



NATURE 479, S. 506–509, 2011, FIG. 1B

Wenn Wasser gefriert, nehmen große Molekülgruppen eine Struktur zwischen flüssig und fest ein (grün). Dazwischen liegen Kerne aus kristallinem Eis (rot).

ARCHÄOLOGIE

Hochseefischerei vor 42 000 Jahren

Seit Urzeiten nutzt der Mensch Fische und Meeresfrüchte aus Küstennähe. Beweise dafür, dass er auch auf hoher See gefischt hat, gab es bislang nur aus den letzten 12 000 Jahren. Neue Funde auf der Insel Timor in Südostasien belegen nun aber, dass *Homo sapiens* dort schon vor 42 000 Jahren Hochseefischerei betrieb.

Archäologen um Sue O'Connor von der Australian National University in Canberra (Australien) untersuchten die Kalksteinhöhle Jerimalai, die an der Ostküste Timors liegt. Sie entdeckten dort zahlreiche Gegenstände und Nahrungsreste, die wohl die Bewohner aus dem späten Pleistozän vor etwa 42 000 Jahren hinterlassen haben. Neben Feuersteinwerkzeugen und Muschelresten fanden sie zahlreiche Fischknochen, unter anderem von Tunfisch. Da dieser sich normalerweise nicht in der Nähe der Küste aufhält, gehen die Forscher davon aus, dass die damaligen Menschen bereits weit aufs Meer hinausfuhren, um ihn zu fangen.

An der Fundstelle kam auch der älteste bekannte Angelhaken zu Tage, der auf 16 000 bis 23 000 Jahre datiert ist und aus dem Gehäuse einer Meeresschnecke gefertigt wurde. In jener Zeit standen oft Stachelmakrelen und Zackenbarsche auf der Speisekarte, wie die Überreste in der Höhle belegen. Diese Fische werden vorwiegend geangelt. Für Tunfische hingegen nutzten die Menschen wohl Netze, denn sie erbeuteten vorwiegend junge Tiere, die sich eher darin verfangen als ausgewachsene Exemplare.

Science 334, S. 1117–1121, 2011

SUSAN O'CONNOR, AUSTRALIAN NATIONAL UNIVERSITY

Dieser Angelhaken, gefunden im Osten Timors, stammt aus dem Pleistozän und wurde aus dem Gehäuse einer Meeresschnecke gefertigt. Gezeigt sind beide Seiten.

ASTRONOMIE

Schwarze Löcher mit Rekordmassen

Wohl alle großen Galaxien besitzen in ihrem Zentrum ein supermassereiches Schwarzes Loch. Es sorgt bei Quasaren, den Kernen von aktiven Galaxien, dafür, dass sie intensiv leuchten. Um die Helligkeit der lichtstärksten Quasare zu erklären, die Astronomen beobachtet haben, müssen deren Schwarze Löcher mindestens zehn Milliarden Sonnenmassen enthalten. Nicholas McConnell von der University of California in Berkeley (USA) und seine Kollegen sind nun erstmals auf zwei Objekte dieser Größenordnung gestoßen.

Das Team untersuchte die elliptischen Galaxien NGC 3842 im Sternbild Löwe und NGC 4889 im Sternbild Haar der Berenike. Beide sind rund 300 Millionen Lichtjahre von uns entfernt. Für das Schwarze Loch im Zentrum von NGC 3842 ermittelten die Forscher 9,7 Milliarden Sonnenmassen, für jenes im Zentrum von NGC 4889 kamen sie auf etwa 21 Milliarden Sonnenmassen.

Die Wissenschaftler vermuten, dass beide Monster aus einer Verschmelzung gasarmer Galaxien hervorgegangen sind. Dabei fusionierten, so die Theorie, die zentralen Schwarzen Löcher der Vorgängergalaxien, wobei sich ihre Massen addierten.

Nature 480, S. 215–218, 2011

NASA, JPL / CALTECH

Sowohl Galaxien mit Zentralverdickung (links oben) als auch solche ohne Zentralverdickung (rechts unten) können supermassereiche Schwarze Löcher beherbergen.

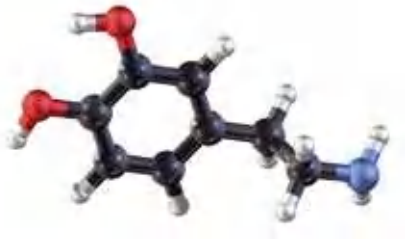
MEDIZIN

Dopamin gegen Tumoren

Die Blutgefäße von Tumoren sind häufig undicht, gewunden und ungewöhnlich geweitet. Dies beeinträchtigt den Blutfluss und führt zu Sauerstoffmangel in großen Teilen des Tumors, was die Krebszellen resistenter gegenüber Chemotherapien und Strahlenbehandlungen macht. Laut Forschern um Sujit Basu von der Ohio State University in Columbus (USA) kann die Substanz Dopamin, die man eigentlich eher vom Gehirn her kennt, wieder normale Verhältnisse in den Blutgefäßen herstellen.

Dopamin gehört zu den Neurotransmittern, jenen Botenstoffen, die Informationen zwischen Nervenzellen übermitteln. Es wird wegen seiner Wirkung im Gehirn häufig als Glückshormon bezeichnet. Daneben tritt es auch in anderen Geweben auf und steuert dort wichtige Funktionen – unter anderem in Blutgefäßen.

Die Forscher um Basu pflanzten Mäusen menschliche Prostata- und Darmtumoren ein und beobachteten deren Wachstum. Zunächst stellten sie fest, dass sich in den Geschwulsten die bekannten missgestalteten Blutgefäße ausbildeten und ferner das Krebsgewebe keinerlei Dopamin enthielt. Bekamen die Tiere den Neurotransmitter jedoch sieben Tage lang regelmäßig verabreicht, normalisierte sich die Gefäßstruktur. Das förderte die Durchblutung, und der Sauerstoffgehalt im Krebsgewebe stieg an. Wie weitere Versuche zeigten, koppelt das Dopamin an spezielle Rezeptoren in den Gefäßzellen und aktiviert dadurch verschiedene Wachstums- und Transkriptionsfaktoren.



ISTOCKPHOTO / MARTIN MCCARTHY

Das Modell eines Dopaminmoleküls. Der Stoff kommt vor allem im Mittelhirn vor.

Für die Krebsmedizin könnte sich der Neurotransmitter gleich auf zweierlei Weise als nützlich erweisen. Indem er die Durchblutung verbessert, lässt er Krebsmedikamente leichter in den Tumor eindringen, so dass sie dort effizienter wirken. Außerdem erhöht die bessere Sauerstoffversorgung des entarteten Gewebes die Erfolgschancen einer Strahlentherapie.

PNAS 108, S. 20730–20735, 2011

MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de

Aktuelle Spektrogramme
finden Sie täglich unter
www.spektrum.de/spektrogramm

VERHALTENSFORSCHUNG

Altruistische Ratten

Ratten zeigen so etwas wie Mitgefühl: Sie befreien gefangene Artgenossen aus einem Käfig, selbst wenn sie sich dadurch um eine größere Portion Schokolade bringen. Das haben Wissenschaftler um Inbal Ben-Ami Bartal von der University of Chicago (USA) beobachtet. Sie deuten das Verhalten der Tiere als Ausdruck von Empathie.

Je zwei Ratten waren an diesen Experimenten beteiligt. Das frei laufende Tier hatte die Möglichkeit, die Tür eines Käfigs zu öffnen und dadurch einen gefangenen Artgenossen frei zu lassen. Anfangs umkreisten die freien Ratten den Käfig, attackierten ihn und nahmen Kontakt mit den darin Eingesperrten auf. Nach durchschnittlich sieben Tagen hatten sie gelernt, die Tür zu öffnen, und taten es von da an zielgerichtet.

War der Käfig jedoch leer oder enthielt er eine Spielzeugratte, beachteten die Tiere ihn nicht weiter. Und wurden sie vor die Wahl gestellt, ihren Artgenossen zu befreien oder einen Käfig zu öffnen, in dem Schokolade bereitlag, taten sie beides und teilten die Süßigkeit mit den ehemaligen Gefangenen.

Die Anwesenheit einer Ratte im Käfig erregt die Neugier eines Artgenossen (links). Mit der Zeit lernt die freie Ratte, die Käfigtür zu öffnen (rechts).

INBAL BEN-AMI BARTAL, UNIVERSITY OF CHICAGO

Dieses Verhalten lässt sich nicht damit begründen, dass die Ratten lediglich die Alarmrufe ihrer gefangenen Artgenossen abstellen wollten: Dazu kamen die Rufe zu selten. Reine Neugier scheidet als Motiv auch aus, da die Ratten mehr als einen Monat lang – bis zum Ende der Versuche – bei ihrem Verhalten blieben. Und dass die Tiere den Käfig zufällig geöffnet hatten, ist ebenso unwahrscheinlich, denn sie handelten im Lauf der Versuche immer schneller und zielgerichteter und zeigten sich immer weniger überrascht vom Ergebnis ihrer Aktion. Es war auch nicht die Aussicht auf sozialen Kontakt, die die Nager zur Befreiungsaktion veranlasste: Die Tiere erlösten ihre Gefährten selbst dann, wenn sie anschließend jedes Mal von ihnen getrennt wurden. Somit bleibt als plausible Erklärung nur, dass die Ratten mit ihrem Verhalten das Leid der Gefangenen beenden wollten.

Science 334, S. 1427–1430, 2011

GENETIK

»Sprachgen« hilft beim Lernen

Das Gen *FOXP2* hat großen Einfluss auf die Artikulationsfähigkeit: Funktioniert es nicht mehr, leiden die Betroffenen unter massiven Sprachproblemen. Zudem scheint zumindest seine menschliche Variante bestimmte Lernvorgänge zu fördern, wie Wissenschaftler vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig herausgefunden haben. Vielleicht half es unseren Vorfahren, sich die komplexen Muskelbewegungen anzueignen, die das Sprechen ermöglichen.

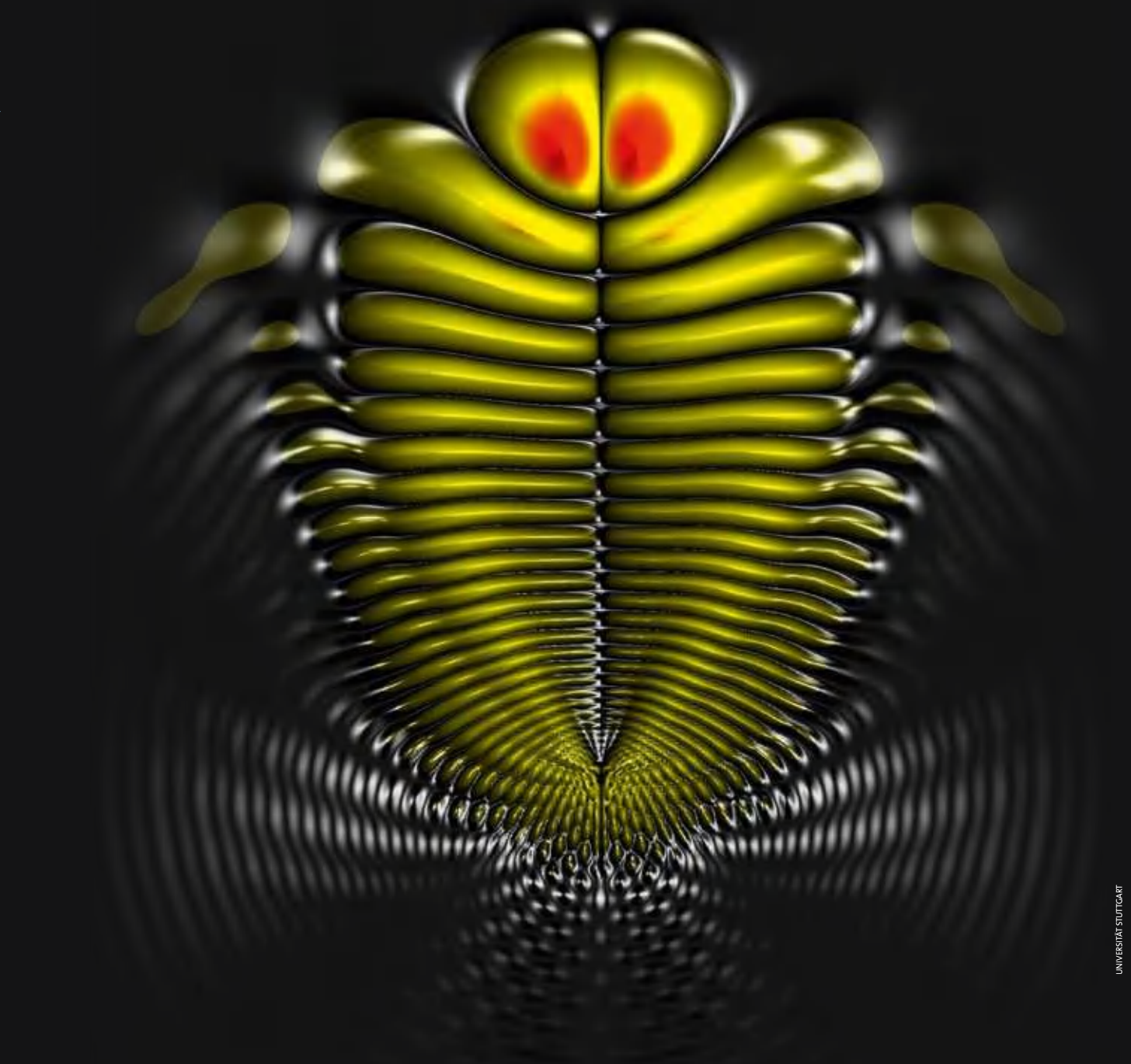
Die Forscher um Christiane Schreiweis pflanzten Mäusen die menschliche *FOXP2*-Variante ein. Daraufhin lernten die Tiere deutlich leichter: Nach durchschnittlich acht Tagen Training konnten sie sich mit Hilfe von Schlüsselreizen zuverlässig in einem Labyrinth orientieren. Ihre Artgenossen, die nur die normale Mausvariante des Gens besaßen, brauchten dafür im Mittel zwölf Tage.

Frühere Versuche hatten bereits ergeben, dass Mäuse mit der menschlichen *FOXP2*-Version höhere Rufe ausstoßen als ihre wilden Artgenossen und sich von ihnen auch in der Verschaltung der Basalganglien unterscheiden – das sind Teile des Großhirns, die unter anderem für Bewegungskontrolle und motorisches Lernen zuständig sind.

FOXP2 tritt bei den meisten Wirbeltieren in sehr ähnlicher Form auf. Es beeinflusst Hirnregionen, die am Einüben von Bewegungsabläufen mitwirken. Die menschliche Version des Gens unterscheidet sich geringfügig von der des Schimpansen, ist aber identisch mit der Neandertalervariante. Sie entstand demnach, bevor sich die Neandertalerlinie und die des *Homo sapiens* trennten – also vor mehr als 500 000 Jahren.

Nature 10.1038/nature.9395, 2011

ELEKTRONEN-ASSEL



UNIVERSITÄT STUTTGART

Normalerweise sollten bei einer Verbindung aus zwei gleichen Atomen die beteiligten Elektronen gleichmäßig zwischen ihnen verteilt sein. Denn die Anziehungskraft der beiden positiv geladenen Kerne wirkt symmetrisch auf die negativ geladenen Teilchen. Bei diesem Molekül aus zwei Rubidiumatomen beruht die Bindung jedoch auf einem einzigen hochangeregten Elektron eines der beiden Partner, dessen Kern sich im unteren Teil des gelben Bereichs befindet. Das verändert die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Elektrons, dargestellt durch die ring- und wurstförmigen Strukturen auf dem im Computer berechneten und eingefärbten Bild. Besonders hoch ist sie im Bereich der beiden roten Flecke, zwischen denen der andere Atomkern liegt.

Damit handelt es sich hierbei um den ersten Nachweis einer Ladungstrennung innerhalb einer Verbindung aus zwei gleichen Atomen: Der Bereich des im Bild oben liegenden Atoms ist negativ geladen, der des anderen positiv. Der eigentlich zu erwartende Ausgleich findet nicht statt, weil die Atome dafür viel zu weit voneinander entfernt sind – das Molekül ist so groß wie ein Virus.

Science 334, S. 1110–1114, 2011

BRAUNE ZWERGE

Sterne mit Raumtemperatur

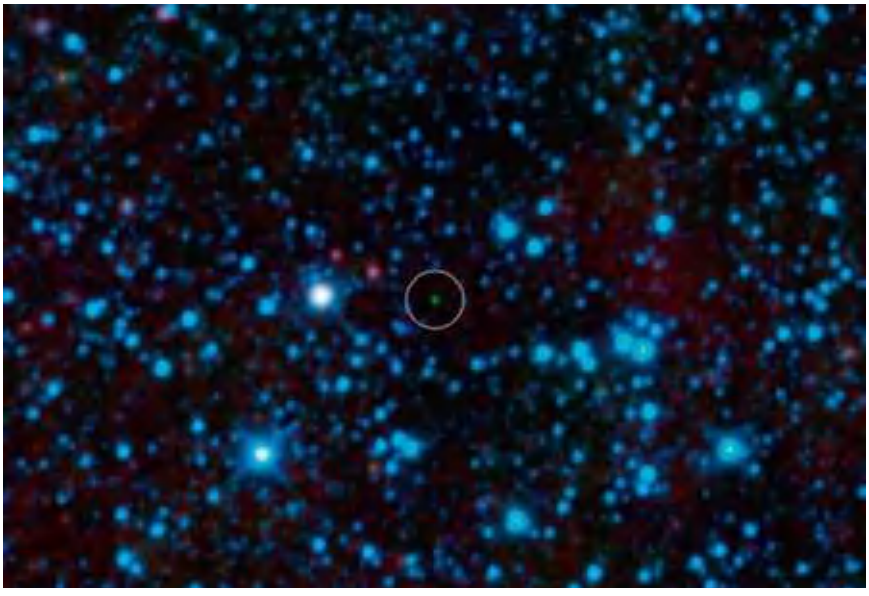
Mit dem Infrarotteleskop WISE haben Astronomen die bislang kühlsten Zwergsterne gefunden. Einer von ihnen ist mit 25 Grad Celsius nicht einmal körperwarm.

VON JAN HATTENBACH

Eindrucksvolle 15 Millionen Grad Celsius herrschen im Kern der Sonne. Nach außen nimmt ihre Temperatur aber drastisch ab. Die sichtbare Oberfläche, die Photosphäre, bringt es auf gerade noch rund 6000 Grad. Massereichere Sterne erreichen hier bis zu mehrere hundertausend, die kleinsten Exemplare immerhin noch 2000 Grad.

Noch tiefere Sterntemperaturen hatten die astronomischen Datensätze lange nicht zu bieten. Die nächstkühleren Objekte waren die Planeten. Sie besitzen kaum innere Energiequellen und sind daher vor allem auf die Strahlung ihrer Zentralsterne angewiesen. In Jupiters äußeren Atmosphärenschichten messen die Forscher darum minus 110 Grad, beim sonnenfernsten Planeten Neptun nur noch minus 200 Grad.

Mittlerweile aber sind Forscher in die »Lücke« zwischen Planeten und Sternen vorgestoßen. Schon vor einigen Jahrzehnten hatten sie vermutet, dass man hier gescheiterte Sterne finden könnte: Objekte, die groß genug sind, damit in ihrem Innern zumindest zeitweise Kernfusionsprozesse einsetzen, aber zu klein, als dass sie daraus zuverlässig für lange Zeit Energie gewinnen könnten. Diese Braunen Zwerge, wie sie in den 1970er Jahren von der berühmten SETI-Forscherin Jill Tarter (SETI: englisch für Suche nach außerirdischer Intelligenz) getauft wurden, besitzen der gängigen Theorie zufolge mindestens 13, aber nicht mehr als 75 bis 80 Jupitermassen. Sie strahlen nur wenig sichtbares Licht ab und sind damit ähnlich schwierig aufzuspüren wie Planeten um andere Sterne. Tatsächlich wurden die ersten von ihnen etwa zeitgleich mit den ersten Exoplaneten Mitte der 1990er Jahre entdeckt. Und das, obwohl es höchstwahrscheinlich viel mehr Braune Zwerge als »richtige« Sterne gibt.

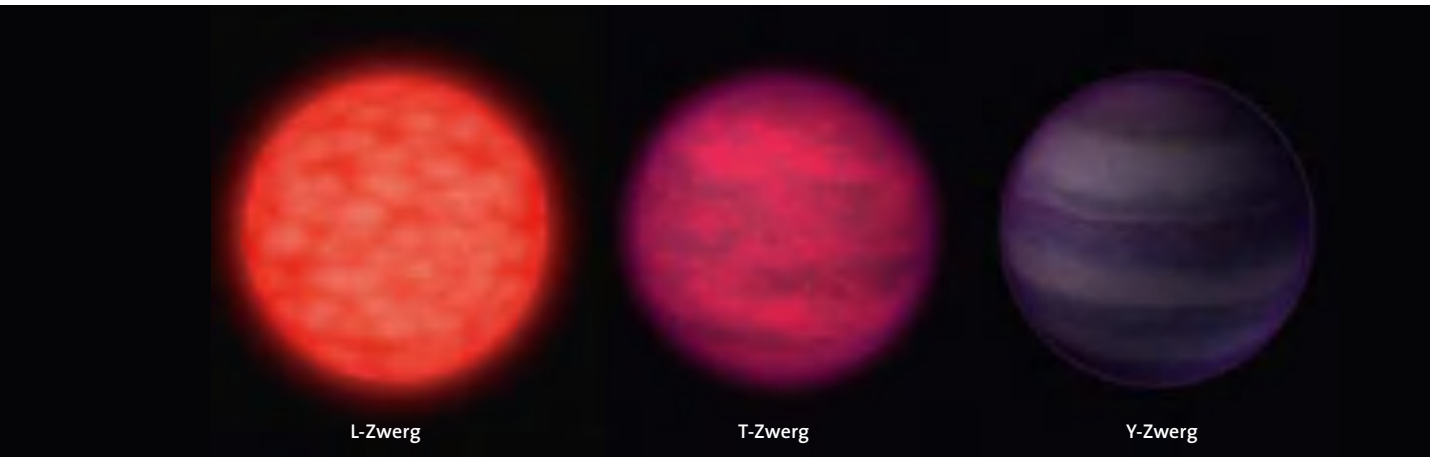


NASA, JPL / CALTECH / UCLA

Mit rund 25 Grad Celsius Oberflächentemperatur ist der Braune Zwerg WISE 1828+2650 (grüner Punkt in Bildmitte) der kälteste, den wir bislang kennen. Wie bei anderen Vertretern dieses Sterntyps reichte seine Masse nicht aus, um in seinem Innern die Kernfusion zu zünden. Das Infrarotbild ist farbkodiert: Rot steht für die längsten, Grün für mittlere und Blau für die kürzesten Wellenlängen.

Ihre Wärmestrahlung macht sie zu lohnenden Zielen für Weltrauminfrarotteleskope wie Spitzer, Herschel oder WISE. Sie sind Gegenstand vieler Fragen: Wo liegt die Massenuntergrenze, bis zu der sich normale Sterne bilden, und was folgt daraus für ihre Entstehungsprozesse? Welche zusätzlichen Entstehungsmechanismen kommen für Braune Zwerge in Frage? Wie können die Astronomen extrasolare Planeten sicher von kühlen Sternen unterscheiden? Und welche besonderen Beobachtungschancen bieten die Objekte? Schließlich dürften sie auch in nächster Nähe zur Erde häufig vorkommen.

Die kühlsten Braunen Zwerge weisen Oberflächentemperaturen von mehreren hundert Grad Celsius auf. Dies war



NASA, JPL / CALTECH

Astronomen teilen Braune Zwerge in drei Spektralklassen ein. Die Atmosphären typischer L-Zwerge besitzen eine Temperatur von rund 1400 Grad Celsius, während T-Zwerge etwa 900 Grad warm sind. Die nun entdeckten Exemplare wurden in die neue Spektralklasse Y eingeteilt, die von etwa minus 100 bis plus 300 Grad Celsius reicht. L- und T-Zwerge besitzen tatsächlich ungefähr die Farben, in denen sie in der Illustration dargestellt sind. Der abgebildete Y-Stern wurde hingegen im Infraroten entdeckt; seine Einfärbung entspricht vermutlich nicht der Realität.

zumindest bis vor Kurzem Stand der Dinge. Mit Hilfe des Satelliten WISE (Wide Field Infrared Explorer), der den Himmel bis zum Februar 2011 im Infrarotlicht beobachtete, konnten die Forscher die Werte jüngst noch weiter hinunterschrauben. Michael Cushing vom California Institute of Technology in Pasadena und seine Kollegen fanden sechs Exemplare, deren Photosphären nicht einmal 250 Grad Celsius heiß sind – Backofentemperatur. Den Rekord bricht aber WISE 1828+2650. Die Photosphäre des etwa 30 Lichtjahre entfernten Objekts bringt es auf gerade einmal 25 Grad, weniger, als im Innern des menschlichen Körpers herrscht. Klassische Sterne werden mit abnehmender Temperatur in die Spektralklassen O, B, A, F, G, K und M eingeteilt (»oh be a fine girl kiss me«, so der Merkspruch); die Sonne etwa ist ein G-Stern. Für Braune Zwerge existierten bislang lediglich die Klassen L und T. Die sechs kürzlich entdeckten Exemplare sind nun aber so kühl, dass sie der neuen Spektralklasse Y zugeordnet werden müssen, berichteten Cushing und seine Kollegen in der Fachzeitschrift »Astrophysical Journal«.

Viele der Objekte bilden sich vermutlich genau wie sonnenähnliche Sterne beim Kollaps großer Gaswolken. Das belegen unter anderem Aufnahmen von Spitzer, auf denen spanische Astronomen 2009 ein Paar Brauner Zwerge entdeckten, die noch im Entstehen begriffen sind. Bereits vier Jahre zuvor hatten Forschergruppen mehrere junge Braune Zwerge gefunden, die ähnlich wie junge Sterne von Staubscheiben umgeben sind. Die Forscher vermuten, dass sich aus ihnen einmal Miniaturplanetensysteme formen könnten – ein tausendstel Mal so groß wie unser eigenes.

Manche Zwerge senden periodisch Radiopulse aus

Einer der Zwerge besaß gerade einmal das Achtfache der Jupitermasse. Würde er einen Stern umrunden, hätte man ihn ohne Weiteres als Planet klassifiziert, zumal sich Braune Zwerge auch ähnlich wie Planeten in den Gas- und Staubscheiben junger Sterne bilden könnten. Als denkbarer Entstehungsprozess gilt zudem, dass bei der Begegnung junger Sterne Gasmassen verwirbelt werden, die sich anschließend zu Braunen Zwergen verdichten, wie Modellrechnungen kanadischer Astrophysiker bereits 2006 zeigten. Noch ist allerdings unklar, welche der gegenwärtig diskutierten Varianten vorherrscht.

Manche der Objekte senden intensive periodische Radiopulse aus, wie US-Astronomen mit Hilfe der Radioteleskope des Very Large Array in New Mexico 2007 überraschend herausfanden. Verantwortlich dafür dürfte die Rotation des Sterns und seiner Magnetfelder sein – wie bei Pulsaren, den ausgebrannten Resten einstmals massereicher Sterne. Zuvor hatte man allerdings geglaubt, die Felder müssten extrem stark sein, um das Phänomen hervorzurufen.

In galaktischen Maßstäben sind uns die meisten der bislang gefundenen Zwerge sehr nah. Die von Cushing entdeckten Exemplare befinden sich in lediglich 9 bis 40 Lichtjahren Entfernung. Wenn sich die Messungen bestätigen, könnte WISE J1541-2250 sogar zur neuen Nummer sieben der sonnennächsten Sterne werden. Und weil die Jagd nach den kühlen Zwergsternen derzeit sehr erfolgreich ist, könnte eine Neuentdeckung sogar dem sonnennächsten Stern Proxima Centauri schon bald den Rang ablaufen.

Jan Hattenbach ist Physiker und freier Wissenschaftsjournalist in Aachen. Er bloggt auf www.scilogs.de/kosmo/blog/himmelslichter.

EVOLUTION

Sinnvolle Selbstüberschätzung

Von sich selbst eine zu hohe Meinung zu haben, hat im Alltag oft negative Konsequenzen. Doch nach einer neuen evolutionstheoretischen Studie bringt es zumindest dann einen Vorteil, wenn der lockende Gewinn das Risiko übersteigt.

VON MATTHIJS VAN VEELEN UND MARTIN A. NOWAK

Man braucht nur Menschen mit Führerschein zu fragen: Die allermeisten glauben, sie fahren besser Auto als der Durchschnitt. Ob wir unsere geistigen Fähigkeiten, unsere Attraktivität oder die psychische Normalität unseres Verhaltens bewerten sollen – stets kommt Ähnliches heraus: Normalerweise schätzen wir uns selbst zu hoch ein. Das zeigte auch eine große amerikanische Studie zur Selbstbewertung von einer Million Oberschülern. Volle 70 Prozent der Jugendlichen hielten sich für überdurchschnittlich, dagegen nur zwei Prozent für unterdurchschnittlich. Amerikanische Collegeprofessoren toppen das noch: Ganze 94 Prozent von ihnen glauben, dass ihre Lehrqualität über dem Mittelwert liegt.

Natürlich können diese Leute mit ihrer Selbsteinschätzung nicht alle Recht haben. Trotzdem ist eine solche Einstellung keineswegs unsinnig oder gar krank. Gerade geistig völlig gesunde Personen erfreuen sich so genannter positiver Illusionen. Das heißt, sie pflegen ihre eigenen Fähigkeiten ebenso wie ihren Einfluss auf andere zu überschätzen, während sie hingegen Gefahren und Risiken für sich selbst gern verkennen und als nicht so schlimm abtun. Sicherlich gibt es auch Menschen, die damit übertreiben und unmäßig große Stücke auf sich halten. Dazu gehören narzisstische Persönlichkeitsstörungen und der Größenwahn. Bei gesunder Selbstüberschätzung hingegen sieht man sich anscheinend oft nur ein klein wenig zu rosig. Wieso ein leicht überhöhtes Eigenbild so oft auftritt und weshalb es von Vorteil ist, erklären der Biologe und Politologe Dominic D. P. Johnson von der University of Edinburgh und der Sozialwissenschaftler James H. Fowler von der University of California in San Diego anhand eines Evolutionsmodells *(Nature 477, S. 317, 15. September 2011)*.

Evolutionstheoretiker fragten sich schon länger, wieso die Neigung von Menschen zu einem überhöhten, somit falschen Selbstbild der natürlichen Selektion überhaupt standhält. So stark verbreitet wie diese Eigenschaft unter uns offenbar ist, muss sie wohl irgendeinen evolutionären Anpassungswert haben. Nur: Was kann gut daran sein, sich selbst so gern falsch zu beurteilen? Verführt das nicht auch zu schmerzhaften Fehlentscheidungen?

Einige Forscher vermuteten den Vorteil darin, dass auf Grund unseres selbstgewissen Auftretens auch andere von uns eine hohe Meinung gewinnen. Denn es vermag nun einmal niemand seine Mitmenschen besser von den eigenen Qualitäten zu überzeugen als derjenige, der fest an sich selbst glaubt. Ebendieser Zusammenhang sollte demnach im Lauf der Evolution die Selbstbeurteilung hochschaukeln. Gelegentlich mögen uns dann zwar Fehler unterlaufen, doch sollte die hohe Wertschätzung, die wir erfahren, kleine Misslichkeiten aufs Ganze gesehen überwiegen.

Aber Johnson und Fowler erklären das Phänomen nun ganz anders. Ihrem Modell zufolge verhilft einem ein falsches Selbstbild sogar eher zu einer vorteilhaften Entscheidung als ein reelles. Wieso? Die beiden Forscher verwenden bei ihrer Untersuchung das Werkzeug der Spieltheorie (siehe »Stichwort«), weichen allerdings in einem wesentlichen Aspekt davon ab. Und zwar setzen sie nicht allein auf rationale oder quasirationale Entscheidungsprozesse.

Suche nach der besten Strategie

Ihr Ansatz geht wie folgt: Angenommen, es gibt eine wertvolle Ressource, und zwei Individuen können jedes für sich entscheiden, ob sie darauf Anspruch erheben. Möchten beide das begehrte Objekt haben, werden sie im einfachsten Fall darum kämpfen – ein für beide Seiten kostspieliger Einsatz, bei dem der Stärkere gewinnt. Falls nur einer die Ressource anstrebt, erhält derjenige sie natürlich ohne Kampf. Falls von vornherein keiner von ihnen einen Anspruch erhebt, gehen zwangsläufig beide leer aus.

Nun wäre es denkbar, dass jeder die Kampfstärke des anderen schon vorher ganz genau einschätzen kann. Dann wäre die beste Strategie, als Stärkerer zu kämpfen und als Schwächerer nachzugeben. Interessant wird es aber, wenn sich die Stärke des anderen nicht präzis erkennen lässt. Unter Umständen gibt jemand dann sofort klein bei, weil er

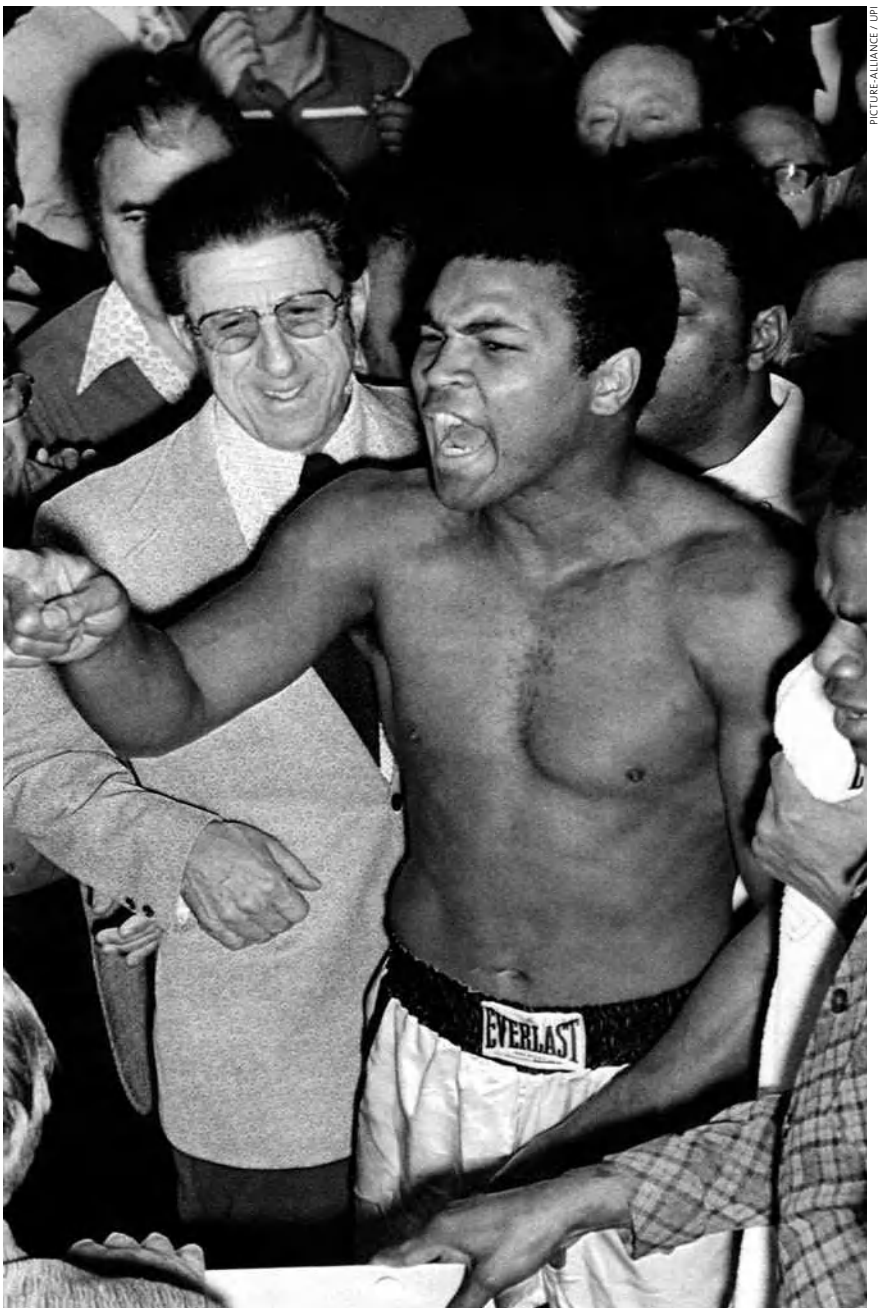
Stichwort

Das hier diskutierte Modell lehnt sich an die evolutionäre Spieltheorie an, die Biologen in Abwandlung der Spieltheorie der Ökonomie entwarfen. Letztere untersucht in mathematischen Modellen Hintergründe von Entscheidungsstrategien und fragt dabei insbesondere nach der dahinterstehenden Rationalität. Erstere befasst sich mit der Evolution von Verhaltensstrategien, das heißt komplexen Verhaltensabläufen, bei Tier und Mensch.

den Gegner für kräftiger hält, als dieser wirklich ist. So könnte manchmal sogar der Schwächere den Sieg davontragen.

Ökonomen entwerfen für solche Konstellationen gern Szenarien, in denen absolute Rationalität herrscht: Die Kontrahenten durchschauen ihre Situation vollkommen. Und sie kennen ebenso die Entscheidungshintergründe des Gegners. Sie wissen also auch, welche Chancen sich der andere für eine bestimmte Situation gegen sie ausrechnet, und versuchen das bei ihrem eigenen Verhalten zu berücksichtigen.

Johnson und Fowler halten stattdessen eine Konstellation mit verkürztem, knapperem Entscheidungsweg für plausibler, bei dem Rationalität nur einen Teil ausmacht. In ihrem Modell kommt zu einer einfachen rationalen Komponente (»Kämpfe, wenn du der Stärkere bist«) ein schiefes Selbstbild



PICTURE-ALLIANCE / UPI

Der Boxer Cassius Clay alias Muhammad Ali machte in den 1960er und 1970er Jahren nicht nur durch Weltmeistertitel von sich reden, sondern noch mehr durch übersteigerte Selbstinszenierung und markige Sprüche.

hinzu. Dieses kann überhöht, aber auch zu bescheiden sein.

Nun hängt es vom Wert der Ressource gegenüber den Kosten eines Kampfeinsatzes ab, welches Verhalten in einer Situation am günstigsten ist: gleich klein beigeben oder die Ressource wenn nötig erkämpfen. Fällt ihr Wert stärker ins Gewicht als die möglichen Einbußen, lohnt ein wenig Selbstüberschätzung durchaus. Denn dann zählt das Risiko, dass es zum Kampf kommt, eher wenig im Vergleich zu dem hohen Gewinn, der anfallen kann, wenn einem keiner die Ressource streitig macht.

Im umgekehrten Fall, wenn die Kampfkosten den Gewinn übersteigen, sollte man die eigene Stärke lieber etwas zu niedrig bewerten. Genau genommen sind die Verhaltenskonstellationen des Modells von Johnson und Fowler allerdings komplexer als hier beschrieben. Beispielsweise könnte sich in Populationen mit der Zeit ein stabiles Verhältnis von Selbstüberschätzern und Selbstunterschätzern herausbilden.

Allerdings ließe sich überhöhte Selbstachtung evolutionär auch noch anders erklären. Ein gutes Beispiel dafür ist Roulette: Wer fest daran glaubt, dass sein Einsatz irgendwann alles abräumt, der spielt immer wieder – auch wenn er ständig verliert. Doch die Gewinner sind in der Regel ebensolche Vielspieler. Wo der Gewinner alles bekommt, herrscht somit eine starke Selektion auf Selbstüberschätzung.

Theoretisch könnte die Gewinnstrategie – die hohe Kampfkosten vermeidet – im Gehirn auf zwei Weisen verankert sein. Entweder kämpfe nur, wenn du dich für stärker hältst, aber überschätze dich dabei ruhig etwas. Bei der zweiten Möglichkeit herrscht perfekte Rationalität, also komplette Einsicht in die Situation, und die Selbsteinschätzung entspricht der tatsächlichen Kampfstärke. Falls nun der Kampfausgang vorher nicht ganz sicher ist, lohnt es sich aber, auch gegen einen etwas stärker scheinenden Gegner anzutreten. Welche Möglichkeit unser Verhalten besser beschreibt, müssen zukünftige Studien erweisen.

Aufschlussreich wäre herauszuarbeiten, wie die Befunde des Modells und verschiedene Alltagssituationen zusammenhängen: bei überhöhtem Selbstvertrauen im Handel; bei der Bereitschaft, übermäßig komplexe Finanzprodukte zu kaufen (angeblich Hintergrund der Finanz- und Bankenkrise); bei politischen Entscheidungen, die zu Kriegen führen. Wenn sich 94 Prozent der amerikanischen Collegeprofessoren für überdurchschnittlich gut halten, müsste bei ihnen ja genügend Selbstvertrauen herrschen, um sich an solche Fragen heranzuwagen.

Matthijs van Veelen forscht an der Universität Amsterdam, **Martin A. Nowak** ist Professor an der Harvard University in Cambridge (Massachusetts).

© Nature Publishing Group
www.nature.com
Nature 477, S. 282 – 283, 15. September 2011

MOLEKÜLSIMULATION

Das Innenleben des Spinnenfadens

Hauchdünn und dennoch unglaublich reißfest – Spinnenseide hat erstaunliche Eigenschaften. Computersimulationen ihres inneren Aufbaus zeigen, warum.

VON FRAUKE GRÄTER

Ein Spinnennetz ist ein kleines Wunderwerk der Natur. Im Gegensatz zu anderen Materialien wie Stahl oder Kunststoff kombiniert die Spinnenseide zwei Eigenschaften, die auf den ersten Blick unvereinbar scheinen: Erstens reißt selbst ein hauchdünner Faden erst bei vergleichsweise sehr hohen Zugkräften. Zweitens kann er stark gedehnt werden, bevor er bricht – nämlich um das Zwei- oder sogar Dreifache seiner Länge, je nach Spinnen- und Seidenart.

Physikalisch gesprochen ist die Arbeit, die man beim Ziehen leistet, gleich Kraft mal Weg (hier die Ausdehnung). In einen Seidenfaden kann man also sehr viel mechanische Arbeit hineinstecken. Diese Eigenschaft bezeichnet man in der Mechanik auch als Zähigkeit. Zum Vergleich: Stahl bricht zwar erst bei hohen Kräften, verändert dabei seine Länge aber nur wenig. Ein konventionelles Gummiband hingegen lässt sich sehr stark dehnen, reißt jedoch schon bei relativ geringer Krafteinwirkung. Übrigens kommen auch die Fäden der Seidenraupen, die zu Stoffen verwoben werden, in dieser Hinsicht nicht an die Spinnenseide heran.

Woran liegt es, dass die Seidenfäden der Spinne diese besonderen Eigenschaften besitzen? Schon seit Jahrzehnten versuchen Forscher, ihr Geheimnis zu lüften. Optimal wäre es, die einzelnen Verformungen von Molekülen innerhalb des gespannten Fadens in Echtzeit verfolgen zu können. Nur lassen sich leider die Bausteine der Seidenfaser nicht so einfach voneinander trennen, um sie einzeln zu studieren. Versucht man das, verlieren sie ihre charakteristischen strukturellen und mechanischen Eigenschaften, die sie im Gesamtzusammenhang des Seidenfadens besitzen. Selbst wenn man alle diese Eiweißbausteine im Labor zusammenmischt, ist es kaum möglich, daraus einen guten Faden zu spinnen,

so wie es die Spinne schafft. Hinzu kommt, dass sich die entscheidenden Eigenschaften des Seidenfadens erst im Nanometerbereich (milliardstel Meter) finden und dadurch nur indirekt beobachten lassen, zum Beispiel mit Röntgenstreuung.

Zerstückeln im Computer

Angesichts solcher Hürden helfen Simulationen mittels Computer, wie wir sie am Heidelberger Institut für Theoretische Studien (HITS) in der Gruppe für »Molecular Biomechanics« durchführen. Dabei können wir, anders als im Labor, die Seide in kleinste Untereinheiten zerteilen, diese quasi beliebig neu kombinieren und daraus Rückschlüsse auf die Fäden als Ganzes ziehen.

Die Fasern bestehen hauptsächlich aus zwei sehr ähnlichen Eiweißbausteinen: dem Spidroin-1 und -2. Zusammen bilden die Proteine zwei unterschiedliche Phasen, in denen aber jeweils beide Moleküle vorkommen – das lässt sich durch Röntgenstreuung an einzelnen Fasern messen. Die eine Phase ist kristallin, also hochgeordnet, und die Proteinketten sind entlang der Achse der Faser ausgerichtet. Die andere Phase erscheint stark ungeordnet mit ineinander verknäuelten Ketten, ähnlich wie eine Portion gekochter Spagetti auf dem Teller. Zwar lassen sich mit Experimenten die Details der Phasen nur schwer erfassen, doch konnten wir ihre molekulare Struktur am Computer nachbauen.

Wir haben hierfür Modelle entwickelt, welche die genaue Anordnung der Atome dieser Strukturen zueinander aufzeigen. Nun können wir am Computer solch ein Modell unter eine hohe Zugspannung setzen und in aufwändigen Simulationen beobachten, wie es sich verformt und letztendlich bricht *(Biophys. J. 100, S. 1298–1305, 2011)*. Das Ergebnis einer solchen Molekulardynamiksimulation zeigt Bild a (im Kasten rechts). Hier simulierten wir einen Seidenkristall der Spinne, aus dem ein einzelner Proteinstrang herausgezogen wird – ein Vorgang, der Kräfte von einigen Nanonewton erfordert. Diese Werte sind natürlich winzig im Vergleich zu den Kräften im Newtonbereich, mit denen wir im Alltag zu tun haben. Doch für das Auseinanderziehen von anderen Proteinen braucht man laut Studien von uns und anderen Forschungsgruppen nur ein paar hundert Pikonewton, also etwa eine Größenordnung weniger. So betrachtet ist der kristalline Baustein der Seide extrem reißfest. Vermutlich ermöglicht es die besondere Struktur der kristallinen Einheiten, die Proteinketten so miteinander zu verknüpfen, dass eine Seidenfaser großen Kräften standhalten kann, ohne zu reißen.

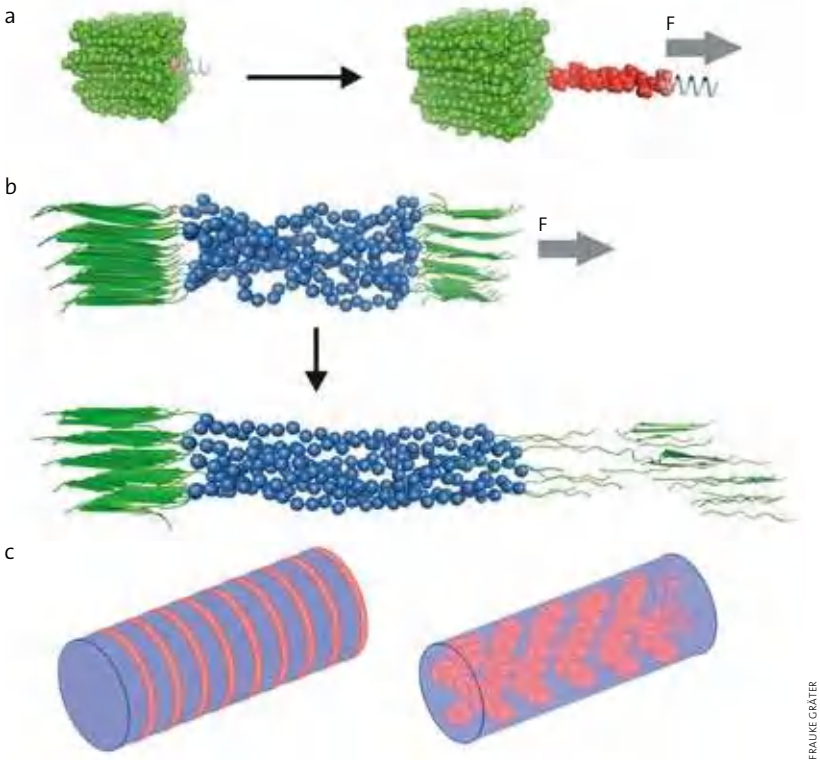
Woher rührt dann die Fähigkeit des Fadens, sich so stark auszudehnen? Der Kristall selbst lässt sich nur um drei bis fünf Prozent dehnen, bevor er entzweibricht, trägt also nur geringfügig zur Elastizität der Seide bei. Unsere Computersimulationen zeigten, dass hierfür stattdessen die amorphe, ungeordnete Phase verantwortlich ist. Wir haben am Computer zwei Kristalle über ungeordnete Proteinketten miteinander verknüpft und der Zugspannung ausgesetzt. Die Proteinketten ließen sich dabei auf etwa die doppelte Länge strecken. Erst dann waren die Kräfte in den Kristallen so hoch, dass sie anfingen aufzubrechen (Bild b).

Ein wesentliches Geheimnis der Seidenfäden liegt also im Zusammenspiel der zwei Phasen. Aus der Simulation folgerten wir, wie die beiden zueinander angeordnet sein sollten, damit sie optimal »zusammenarbeiten«: Anstatt

Computermodell der Seidenfaser

Aus einem Seidenkristall (grün), wie er in Spinnenfäden vorkommt, wird in einer Computersimulation ein Seidenprotein (rot) herausgezogen (a). Seidenkristalle können wesentlich größeren Zugkräften standhalten als andere Proteine dieser Größe.

Die Elastizität einer Seidenfaser entsteht durch die Streckung von verknäuelten Proteinsträngen (blau) zwischen den Kristallen (grün) (b). In dem neuen Modell einer gesamten Seidenfaser (c) können die Kristalle (rosa) entweder in Scheiben angeordnet vorliegen (links) oder zufällig in der amorphen Phase (blau) verteilt sein (rechts). Ersteres führt zu einer höheren mechanischen Belastbarkeit.



FRAUKE GRÄTER

einer zufälligen Verteilung im Faden, wie sie bisher gemeinhin für Seide angenommen wurde, erweist sich eine Anordnung in Scheiben als vorteilhaft (Bild c, links). Das sorgt für eine homogene Kraftverteilung und dadurch für maximale Belastbarkeit.

Mit einer bewährten Methode aus dem Bauingenieurwesen, der Finite-Elemente-Analyse, bestätigten wir dies. Die oben beschriebenen Molekulardynamiksimulationen sind nämlich so aufwändig, dass nur ein paar der Bausteine damit berechnet werden können – und selbst das dauert mehrere Wochen. Mit Hilfe der Finite-Elemente-Analyse konnten wir stattdessen ganze Seidenfasern simulieren. Demnach führt die parallele Anordnung der geordneten und ungeordneten Phasen in Scheiben zu höherer Stabilität. Optimal ist dabei ein kristalliner Anteil von 10 bis 40 Prozent.

Inwieweit die Natur dieses Bauprinzip in der Seide umsetzt, darüber sind sich die Forscher noch nicht einig. Doch laut unseren Simulationen sollte es angestrebt werden, wenn es darum geht, ein Material mit Eigenschaften wie denen der Seide zu entwerfen.

Frauke Gräter leitet seit 2009 die Forschungsgruppe Molecular Biomechanics am Heidelberger Institut für Theoretische Studien (HITS).

NANOPHOTONIK

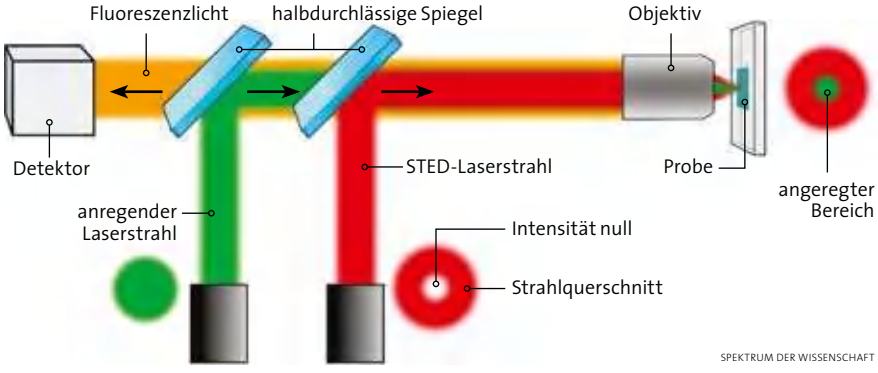
Leuchtende Quantenmagnete unterm Mikroskop

Ein Trick, der vor über zehn Jahren die Fluoreszenzmikroskopie revolutionierte, setzt bei magnetischen Quantenspeichern buchstäblich neue Maßstäbe. Die STED-Technik, mit deren Hilfe Forscher die Auflösungsgrenze im Lichtmikroskop überwinden, registriert nun auch in winzigen Störstellen von Diamanten gespeicherte Informationen.

VON MIKE BECKERS

Mehr als ein Jahrhundert lang galt in der Mikroskopie ein unumstößliches Gesetz: Die Wellenlänge des Lichts, das auf ein Untersuchungsobjekt fällt, bestimmt die erreichbare Auflösung. Nur Strukturen, die gröber sind als etwa 200 Nanometer, lassen sich im sichtbaren Licht noch unterscheiden. Bei kleineren dominieren Beugungseffekte – dann verschwimmt das Bild.

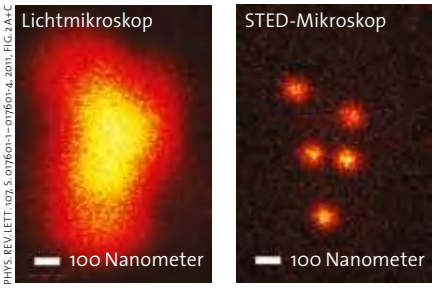
Diese fundamentale Einschränkung überwinden Forscher unter anderem mit der STED-Mikroskopie (stimulated emission depletion). Ihr Erfinder ist Stefan Hell, heute Direktor am Göttinger Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie. Nachdem er die Idee 1994 vorgestellt hatte, demonstrierte der Physiker sein Verfahren fünf Jahre später erstmals im Experiment. Seither hat es ihm zahlreiche Preise eingebracht, und seit 2007 untersuchen Wissenschaftler Material- oder Gewebeproben mit kommerziellen STED-Mikroskopen.



In einem STED-Mikroskop wird der Anregungsstrahl (grün) von einem ringförmigen STED-Strahl (rot) überlagert, in dessen Mitte die Intensität null beträgt. Wo er auf die Probe trifft, regt er die Moleküle sofort wieder ab und schaltet ihre Fluoreszenzfähigkeit aus. Nur die Moleküle, die sich innerhalb eines kleinen Flecks befinden, leuchten dann noch. So lassen sich feinere Details erkennen, als wenn benachbarte Moleküle ebenfalls fluoreszieren würden. Bewegt man die Probe nun schrittweise, entsteht Punkt für Punkt ein hoch aufgelöstes Bild.

Eine neue Anwendung von STED steckt indessen noch in den Kinderschuhen. Mit STED-ODMR (optical detection of magnetic resonances, optischer Nachweis magnetischer Resonanzen) übertrugen Forscher um Hell die Methode auf ein weiteres physikalisches System. Sie betrachteten die atomaren magnetischen Zustände einer Probe unter dem Lichtmikroskop – bei einer Auflösung von etwa 50 Nanometern *(Physical Review Letters 107, S. 17601, 2011)*.

Die STED-ODMR-Technik analysiert hochreine Diamanten, in deren sonst perfektem Kohlenstoffgitter Unregelmäßigkeiten erzeugt wurden. An diesen so genannten Stickstofffehlstellen im Kristall sitzt an Stelle von Kohlen-



PHYS. REV. LETT. 107, S. 017601-1–017601-4, 2011, FIG. 2A+C

Das Fluoreszenzsignal von mehreren Stickstofffehlstellen im Lichtmikroskop (links) verschwimmt, wenn ihr Abstand die durch Beugungsgesetze vorgegebene Grenze unterschreitet. Die Anzahl der Lichtquellen ist dann unmöglich zu erkennen. Die STED-mikroskopische Aufnahme (rechts) trennt hingegen fünf optische Signale.

stoff ein einzelnes Stickstoffatom; direkt daneben fehlt dem Diamantgitter ein Kohlenstoffatom (Grafik S. 21). Die Fehlstellen verhalten sich wie atomare Magneten, denn an ihnen treten frei gewordene Elektronen aus den angrenzenden Atomhüllen miteinander in Wechselwirkung.

Elektronen besitzen einen quantenmechanischen Drehsinn, der ihre magnetischen Eigenschaften bestimmt. Dieser Spin kann den Wert +½ oder –½ annehmen. In einer Stickstofffehlstelle koppeln zwei solcher Elektronenspins aneinander, so dass sich die Einzelspins entweder zu null auslöschen oder zum Betrag eins addieren. Diese beiden magnetischen Ausrichtungen besitzen dann verschiedene Energien. Stickstofffehlstellen speichern also Information – genau wie die magnetischen Nullen und Einsen auf Computerfestplatten. Sie lassen sich auch zwischen null und eins umschalten. Dazu müssen die Forscher ihre Probe mit Mikrowellen bestrahlen, deren Frequenz dem Energieunterschied zwischen den Zuständen entspricht. Sie können sie aber auch mit dem Licht eines grünen Lasers anregen. Dann absorbieren die Fehlstellen dessen Energie und senden kurz darauf Fluoreszenzlicht größerer Wellenlänge aus, in diesem Fall rotes Licht. Weil null und eins unterschiedlich stark fluoreszieren, lässt sich der Spin der Fehlstelle nun einfach an der Lichtintensität ablesen.

Ideale Bauelemente für Quantencomputer?

Auf Grund ihrer quantenmechanischen und optischen Eigenschaften sind Stickstofffehlstellen in Diamanten schon längere Zeit heiße Anwärter auf die Rolle von Datenspeichern in zukünftigen Quantencomputern (siehe »Spintronik mit Diamant«, SdW 12/2007, S. 112). Die Spinzustände sind auch bei Raumtemperatur außergewöhnlich stabil, und ihre Lebensdauer übersteigt deutlich die Zeit, die für Rechenoperationen benötigt wird. Hinzu kommt, dass sich die Zustände über ihre Fluoreszenz auslesen lassen, die Datenübertragung also auf optischem Weg erfolgen kann.

Unwissen schadet nicht

Die Demokratie braucht Laien.

Die moderne Welt ist schrecklich kompliziert – nehmen wir nur so vertrackte Probleme wie die Eurokrise, »Stuttgart 21« oder die Endlagerung nuklearen Abfalls. In Talkshows und an runden Tischen redet man sich darüber die Köpfe heiß, und der verwirrte Zuhörer findet, dass jeder der gegensätzlichen Standpunkte etwas für sich hat. Aber am Ende muss ein Konsens herauskommen: Eurobonds ja oder nein, Kopf- oder Tiefbahnhof, Gorleben oder ein anderes Endlager.

Sicher soll es dabei demokratisch zugehen, aber je komplizierter das Problem, desto unwissender kommt einem die Mehrheit vor. Kann man wirklich diesem Heer von Laien die Entscheidung überlassen, wo doch Expertise gefragt ist? Als der vormalige griechische Premier Giorgos Andrea Papandreou sein Volk abstimmen lassen wollte, ob es einschneidende Sparauflagen für EU-Kredite gutheiße, gab es europaweites Kopfschütteln – und das Plebiszit wurde schleunigst abgeblasen. Angeblich kursierte in den Brüsseler Wandelgängen sogar der üble Scherz, am besten für Griechenland wäre eine Militärdiktatur. Im Ernst: Kann Demokratie in einer Welt funktionieren, in der nur noch ausgesuchte Experten, sei es für Finanzmärkte, Schienenverkehr oder Endlagergeologie, Bescheid wissen?

Bevor wir die Flinte der Demokratie ins Korn werfen, sollten wir auf Iain D. Couzin hören. Mit seinem Team erforscht er seit Jahren an der Princeton University kollektives Tierverhalten. Insekten, Vögel und Fische dienen ihm als Modelle für die Konsensbildung in sozialen Gruppen. Zur Klärung einzelner Fragen zieht er auch Computersimulationen heran *(Science 334, S. 1578–1580, 2011)*.

Angenommen, eine Population muss sich zwischen zwei Optionen A und B entscheiden. Die Mitglieder werden zufällig von den Nachbarn beeinflusst, deren Ansicht zu übernehmen, leisten aber einen gewissen Widerstand, wenn sie die einmal gefasste Meinung ändern sollen. In der Population gibt es drei unterschiedliche Typen von Individuen. Zwei davon favorisieren jeweils von vornherein sehr stark eine der beiden Ansichten. Das sind sozusagen die »Experten«. Es gibt aber noch eine dritte Sorte von Teilnehmern: Die haben keine Präferenz und sind leicht beeinflussbar; sie spielen die »uninformierten Laien«.

Wie sich sowohl im Computermodell als auch in Tierexperimenten mit schwarmbildenden Süßwasserfischen zeigte, sorgen erst die »Laien« für einen demokratischen Meinungswechsel. Falls es nämlich nichts als kontroverse Experten gibt, setzt sich einfach die zahlen- oder meinungsstärkere Fraktion durch: Sie erzwingt die Entscheidung in ihrem Sinn – selbst wenn dies der Population schadet.

Im Tierversuch wurden die Fische mehrheitlich darauf konditioniert, ein gelbes Ziel anzusteuern, wo sie Futter erwarteten – das sich nun aber am anderen, blauen Zielort befand. Im Extremfall kompletter Konditionierung wäre die gesamte Population verhungert. Erst durch Beimengung einer Teilgruppe von unkonditionierten – »unentschlossenen« – Fischen bekehrte sich der Schwarm ziemlich rasch dazu, den Weg zum neuen Futter spendenden Ziel zu nehmen.

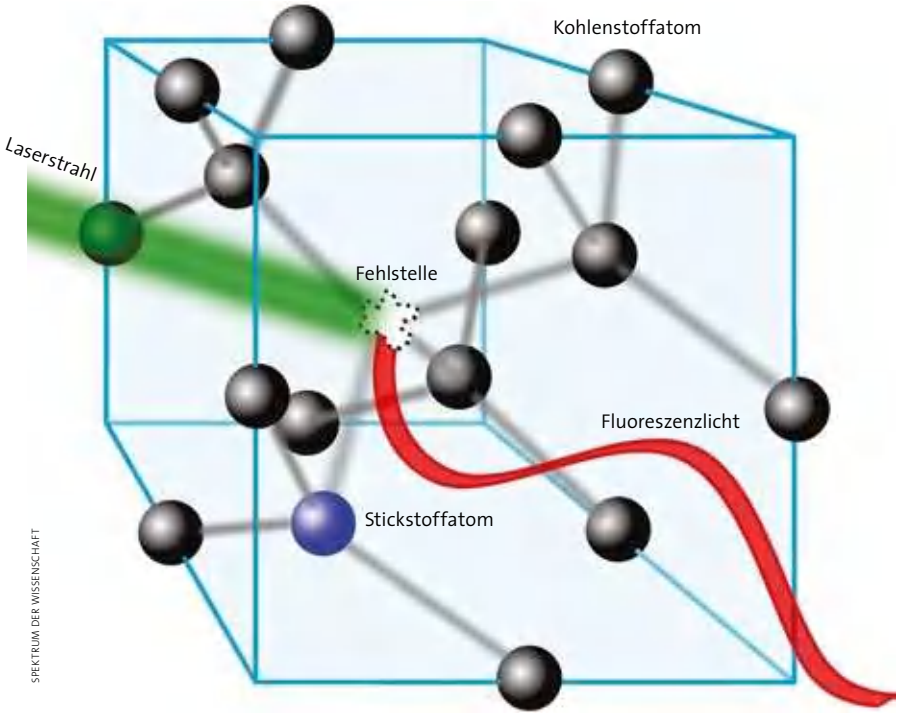
Wie das Experiment demonstriert, spielen uninformierte Individuen eine wichtige Rolle bei der »richtigen«, realitätsgerechten Konsensbildung. Indem der Laie die Angelegenheit ohne vorgefasste Meinung bewertet, ermöglicht er ein sachgerechtes Ergebnis, das auf demokratischem Weg zu Stande kommt. Es ist also durchaus zielführend, die Entscheidung über ein kompliziertes Problem – nach Anhörung von Pro und Kontra – einer Bevölkerung zu überlassen, die keineswegs nur aus Experten besteht.

Michael Springer

Doch wenn die Information einer Fehlstelle sich über das Aussenden von Licht verrät, unterliegt auch dieses Signal der Beugungsgrenze. Damit wäre die Dichte der Daten, die sich mit einem Mikroskop aus dem Kristall auslesen lassen, durch die Wellenlänge des ausgesandten Lichts begrenzt. Hier kommt der Trick ins Spiel, mit dem Stefan Hell bereits in den 1990er Jahren die Auflösungsgrenze überwand. Bestrahlt man Moleküle mit einem Laser, um sie zum Fluoreszieren anzuregen, ist die leuchtende Fläche anschließend mindestens so groß wie der Fokus des Lasers. Auch dieser lässt sich infolge von Beugungseffekten nicht beliebig verkleinern.

Doch Hell richtete einen zusätzlichen ringförmigen Laserstrahl – wegen seiner Form Donutstrahl genannt – auf die Probe. Dieser zwingt die angeregten Moleküle zu so genannter stimulierter Emission: Sie senden also Photonen entsprechend der Frequenzen aus dem Donutstrahl aus. Damit haben sie ihre Energie verloren und sind gewissermaßen ausgeschaltet. Nur auf einem wenige zehn Nanometer großen Fleck im Zentrum des Donutstrahls, wo dessen Intensität null ist, bringt der anregende Laserstrahl den Farbstoff tatsächlich zum Fluoreszieren (Grafik S. 18). Indem Hell und sein Team die Probe Schritt für Schritt durch den Fokus der einander überlagernden Laserstrahlen bewegten, ließen sie Punkt für Punkt ein mikroskopisches Bild entstehen.

Bereits 2010 hatte eine Gruppe internationaler Forscher, darunter Hell selbst, ein ähnliches Prinzip an Stickstofffehlstellen demonstriert *(Nature Physics 6, S. 912, 2010)*. Es arbeitet ebenfalls mit einem Donutstrahl, ist aber kein STED-Verfahren im engeren Sinn, weil die stimulierte Emission dabei keine Rolle spielt. Die Forscher unterschieden benachbarte Stickstofffehlstellen anhand der verschieden stark fluoreszierenden Spinzustände null und eins. Unter Federführung des Physikers Peter Maurer, Doktorand an der Harvard University in Boston, richteten sie mit Laser- und Mikrowellenstrahlung zunächst alle Stickstofffehlstellen in den Zustand eins aus. Anschließend ver-



So wird ein Diamant zum leuchtenden Datenspeicher: An künstlich erzeugten Stickstofffehlstellen in seinem Gitter aus Kohlenstoffatomen sitzt Stickstoff (blau) an Stelle eines Kohlenstoffatoms (schwarz); daneben fehlt ein Kohlenstoffatom. Diese Fehlstelle absorbiert grünes Laserlicht und fluoresziert daraufhin rot. Je nach Gesamtspin (nicht abgebildet) der Fehlstelle ist das Fluoreszenzleuchten unterschiedlich hell.

setzten sie mit einem Donutstrahl alle Spins – außer im Zentrum des Strahls – in den Zustand null.

Weil der Zustand null um 30 Prozent heller als der Zustand eins leuchtet, erhielten die Forscher immer dann ein anderes Fluoreszenzsignal aus dem bestrahlten Bereich, wenn das Zentrum des Donutstrahls auf eine Stickstofffehlstelle traf. Durch viele Messungen entlang der Probe unterschieden die Forscher auf diese Weise zwei benachbarte Stickstofffehlstellen, die nur 150 Nanometer voneinander entfernt lagen.

Methodische Unzulänglichkeiten

Die Methode kämpft allerdings mit Unzulänglichkeiten. »Zwischen den An-aus-Zuständen herrscht kein absoluter Hell-dunkel-Kontrast wie zwischen 100 und 0 Prozent, sondern lediglich einer zwischen 100 und 70 Prozent«, erläutert Stefan Hell. Liegen die Stickstofffehlstellen sehr dicht beieinander, so der Physiker, lasse sich das Signal daher nur durch sehr lange Messungen klar identifizieren. Zudem müsse man außer dem Laserlicht auch Mikrowellen einstrahlen und das Resonanzverhalten der Spinzustände kennen, um zwischen ihnen umzuschalten.

Darum stellten Dominik Wildanger aus Göttingen und Jeronimo Maze aus Chile – Maze war schon 2010 mit an Bord – gemeinsam mit Hell 2011 eine neue Variante des Verfahrens zur Vermessung und scharfen Trennung von eng benachbarten Fehlstellen vor. Sie kommt ohne Mikrowellen aus und beruht nur auf optischen Prinzipien: Mit einem STED-Strahl zwangen die Forscher alle Spinzustände außerhalb des Strahlzentrums zur stimulierten Emission. So fielen die Fehlstellen in den dunklen Grundzustand. Dort hielt sie der STED-Strahl auch in der Folge fest, während der anregende Laser nur noch die Fehlstelle im Zentrum aufleuchten ließ.

Mit diesem absoluten Hell-dunkel-Kontrast erreichten sie nicht nur eine beeindruckende Auflösung von etwa 50 Nanometern (siehe Bild S. 19). Auch die Messdauer verringerte sich um mehrere Größenordnungen. Das einzige Problem: Der Laserstrahl muss sehr intensiv sein, um die Moleküle effektiv genug am Fluoreszieren zu hindern. Die 2010 vorgestellte Methode kommt hingegen mit einem schwachen Donutlaser aus; schließlich schaltet sie nur zwischen eins und null um und unterdrückt nicht die Fluoreszenz. Doch dieser Vorteil hebe die Nachteile im Vergleich zu STED nicht auf, so Hell. Mit einem nochmals stärkeren STED-Laser wären, so betonen die Autoren in ihrer Veröffentlichung, sogar Strukturen im Bereich einzelner Nanometer zugänglich. Denn dann ließe sich das Loch in der Mitte des Donutstrahls, in dem Fluoreszenz erlaubt ist, weiter verkleinern.

Für zukünftige Anwendungen ist aber nicht nur die hohe Auflösung und Geschwindigkeit der STED-ODMR-Technik entscheidend, sondern auch ihre Eigenschaft, den ursprünglichen Zustand der Spins zu erhalten. Andernfalls würden die Informationen eines diamantenen Datenspeichers während der Messung verloren gehen. Tatsächlich, so zeigten Experimente, bleibt die Ausrichtung der Spins unter dem STED-Strahl erhalten – zumindest wenn die Intensität des Lasers einen Wert nicht überschreitet, der einer Auflösung von etwa 100 Nanometern entspricht. Bei höherer Intensität nehmen aber immer mehr Spins einen Energiezustand ein, aus dem sie nicht ohne Informationsverlust zurückkehren können.

Im Prinzip scheint es jedoch möglich, dass Computer eines Tages tatsächlich die magnetischen Informationen einzelner, dicht gepackter Kristalldefekte auslesen und optisch übertragen. Von der Elektronik, die auf der elektrischen Ladung von Elektronen beruht, wäre damit ein weiterer Schritt in Richtung der Spintronik erfolgt, die auf dem Spin der Teilchen basiert. Dazu bräuchte es nicht einmal Diamanten. Für das Verfahren kommen den Göttinger Forschern zufolge alle Materialien in Frage, in denen leuchtende Spinzustände existieren.

Mike Beckers ist Diplomphysiker und Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

Ein menschliches Auge unterscheidet sich vom Auge der Fische nur in Feinheiten. Seine Grundkonstruktion und Funktionsweise sind uralt.

FOTO: DAN SAELINGER; AUGE: MIT FRDL. GEN. DER EYE-BANK FOR SIGHT RESTORATION INC. (WWW.EYE-DONATION.ORG)

EVOLUTION

Das Auge – Organ mit Vergangenheit

Die Geschichte des Wirbeltierauges beginnt bei den Vorfahren der Fische. Seine wesentlichen Strukturen entstanden bereits vor einer halben Milliarde Jahren. Auch manche Mängel erklären sich aus dieser Evolution.

Von Trevor D. Lamb

Die Augen gehören zu unseren kompliziertesten Organen. Ähnlich einer Kamera fangen sie Licht ein und fokussieren es auf ihren Hintergrund. Dort gewinnt eine hoch spezialisierte Netzhaut daraus elektrische Signale. Mit Dutzenden verschiedener Nervenzelltypen verarbeitet dieses Häutchen die Information gleich an Ort und Stelle weiter und schickt das Ergebnis dann mit dem Sehnerv ins Gehirn, das daraus Bilder erzeugt.

Lange war schwer vorstellbar, wie eine derart ausgeklügelte Konstruktion überhaupt durch normale Evolution entstehen konnte. Bereits Charles Darwin machte sich hierüber in seinem Hauptwerk »Über den Ursprung der Arten«, das 1859 erschien, ausführlich Gedanken. Die Antwort kannte er noch nicht. Kreationisten und Anhänger eines Intelligent Design halten das Auge sogar für ein Paradebeispiel des Schöpfungsakts. Darwin war allerdings davon überzeugt, dass es nach und nach aus irgendwelchen Vorstufen durch Selektionskräfte entstanden sein muss. Nur – welche Zwischenschritte mag es gegeben haben, über die sich allmählich die einzelnen Komponenten dieses Sehorgans herausbildeten und zusammenfanden, bis es schließlich seine heutigen Aufgaben erfüllte? Und vor allem mussten diese Zwischenstadien für ihre Besitzer schon nützlich gewesen sein.

Direkte Belege von der Evolution des Wirbeltierauges in Form von Fossilien lassen sich nach wie vor schwer beschaffen. Anders als Knochen versteinerten weiche Gewebe höchst selten – und falls doch, sind die Feinheiten meist so ungenügend erhalten, dass keine genauen Rückschlüsse auf die evolutionäre Herkunft möglich sind. Studien der Embryonalentwicklung, Artenvergleiche sowie morphologische und genetische Untersuchungen liefern neue Erkenntnisse. Diese Analysen erlauben jetzt tatsächlich einen Blick darauf, wie und wann sich die wichtigsten Strukturen unseres Auges in der Vorzeit wohl herausbildeten.

Demnach lief die Evolution des Wirbeltierauges in weniger als 100 Millionen Jahren ab. Die Ausgangsstruktur dürfte vor rund 600 Millionen Jahren ein simpler Lichtsensor gewesen sein, mit dessen Hilfe sich frühe Tiere an Tag und Nacht und auch an den Jahreszeiten orientieren konnten. Vor etwa 500 Millionen Jahren sahen die frühen Wirbeltiere – äußerlich fischähnliche Wesen – die Welt schon mit richtigen Augen, deren optische und neuronale Finessen im Wesentlichen denen unserer eigenen Augen glichen. Aber die Evolution hinterließ, wie so oft, gewissermaßen Narben. Denn als Konstruktion ist dieses Auge keineswegs perfekt. Wie immer hat die Natur auch hier vorhandenes Material benutzt und für den neuen Zweck zurechtgeschustert.

Der Beginn des Lebens auf der Erde – und damit auch die Reihe unserer Vorfahren – reicht fast vier Milliarden Jahre zurück. Primitive mehrzellige Tiere teilten sich vor ungefähr einer Milliarde Jahren in zwei Gruppen auf: zum einen in die so genannten Hohltiere oder radialsymmetrischen Tiere (Radiata), zu denen etwa die Quallen gehören; zum anderen in die bilateralsymmetrischen Tiere (Bilateria), wozu das Gros der heutigen Tiere zählt, von den verschiedenen Würmern bis zu den Weich-, Glieder- und Wirbeltieren. Die Hohltiere

AUF EINEN BLICK

DIE EVOLUTION DES WIRBELTIERAUGES

1 An Fossilien lässt sich die Entstehung unseres Auges kaum ablesen. Aber **anatomische, physiologische, genetische und Entwicklungsvergleiche** verschiedener Organismen geben Aufschluss über die Anfänge und frühen Stadien dieser Evolution.

2 Das Wirbeltierauge – ein Kameraauge mit einer Linse – war im Prinzip schon **vor 500 Millionen Jahren** bei den frühen Wirbeltieren des Kambriums fertig entwickelt. Sein Ursprung muss folglich noch weiter zurückliegen.

3 Es begann mit einem **reinen Lichtdetektor**, der eine Orientierung nach der Tages- und Jahreszeit verschaffte. Eine komplexe **Netzhaut und ein optischer Apparat**, die Bildersehen erlaubten, kamen erst später hinzu. Diese Entwicklungen erklären etliche Unzulänglichkeiten unseres Sehorgans.

weisen eine Ober- und Unterseite auf, die Bilateria zusätzlich eine Bauch- und Rückseite – und damit eine Rechts-links-Symmetrie mitsamt Kopf und Hinterende.

Vor rund 600 Millionen Jahren spalteten sich die Bilateria wiederum in zwei wichtige Gruppen auf. Der einen entsprang die Mehrheit der heutigen Wirbellosen, die zweite brachte unter anderem die Wirbeltiere hervor. Schon bald nach dieser Trennung hinterließ vor 490 bis 540 Millionen Jahren die so genannte kambrische Explosion im Fossilbericht deutliche Spuren: Denn damals, teils wohl auch schon vorher, entstanden erstaunlich viele neuartige Grundbaupläne (Hauptmuster) des Körperbaus und mit ihnen die meisten der heutigen Tierstämme. Der Evolutionsschub brachte auch die Voraussetzungen für das Wirbeltierauge.

An Fossilien aus jener Zeit ist zu erkennen, dass während der kambrischen Explosion im Tierreich zwei völlig unterschiedliche Typen von Augen auftraten. Einerseits entwickelte sich schon damals ein so genanntes Fassetten- oder Komplexauge, manchmal auch Netzauge genannt. Diesen Typ weisen insbesondere die Insekten und Krebse auf. Solch ein Sehorgan besteht aus vielen schlanken Einzelaugen mit jeweils eigener Linse und einer Hand voll Sehzellen. Es eignet sich gerade für kleine Tiere. Sie erfassen damit ein weites Blickfeld bei sehr guter zeitlicher, allerdings mäßiger räumlicher Auflösung. Sicherlich leistete das Komplexauge den frühen Gliederfüßern des Kambriums gute Dienste, etwa den ausgestorbenen Trilobiten, und brachte ihnen gegenüber blinden Zeitgenossen Vorteile.

Zwei Typen komplizierter Augen

Für größere Tiere erscheinen Fassettenaugen allerdings eher unpraktisch, denn für eine hinlängliche räumliche Auflösung müssen sie riesig groß sein. Zunehmende Körpergröße bevorteilte offensichtlich die Evolution des zweiten Augentyps: die des Linsenauges, auch Kameraauge genannt. Dieses besitzt nur eine einzige Linse, genauer einen für alle Sehzellen gemeinsam zuständigen Lichtbrechungsapparat. Die Sehzellen oder Fotorezeptoren liegen im Augenhintergrund in einer Netzhaut (Retina), die den Augapfel auskleidet. Und sie gehören im Fall der Wirbeltiere zu einem anderen Typ als etwa die von Insekten.

Nur oberflächlich betrachtet ähneln Tintenfischaugen den unseren. Denn bei genauerem Hinsehen unterscheiden sich beide in manchen wesentlichen Aspekten völlig, etwa im Feinbau der Netzhaut. Auch entsprechen die Fotorezeptoren der Tintenfische dem Insektentypus.

Es erscheint merkwürdig, dass die Wirbeltiere mit einer anderen Klasse von Fotorezeptoren sehen. Von diesem Typ finden sich bei den mit Kiefern ausgestatteten Wirbeltieren – den Kiefermündern; dazu zählen neben den meisten heutigen Fischen auch alle höheren Wirbeltiere – zwei verschiedene Ausführungen: Dem Sehen am Tag dienen so genannte Zapfen, der Nachtsicht die viel lichtempfindlicheren Stäbchen. Weil wir die Evolution der unterschiedlichen Klassen und Varianten von Lichtsinneszellen verstehen wollten, beschlossen Edward N. Pugh jr., damals noch an der University of Pennsylvania in Philadelphia, Shaun P. Collin, der an der University of Queensland (Australien) arbeitete, und ich vor einigen Jahren, deren Herkunft und Werdegang gemeinsam zu erforschen. Dabei gewannen wir nicht nur in dieser Frage mehr Klarheit. Mindestens ebenso faszinierend ist das Szenario, das wir nun vom Ursprung und von der Evolution des Wirbeltierauges zeichnen können.

Wie so manche Forscher vor uns staunten auch wir bei unseren Studien darüber, wie stark sich die Augen völlig verschiedener kieferbewehrter Wirbeltiere gleichen – egal, ob es Fische oder Säugetiere sind. Viele der grundlegenden Merkmale stimmen bei ihnen allen letztlich überein. In so einem Fall dürften die betreffenden Strukturen von einem gemeinsamen Vorfahren abstammen. Da die ersten Kiefermünder vor etwa 420 Millionen Jahren lebten, muss also unser Augentyp schon damals existiert haben. Diese Tiere waren Meeresbewohner und ähnelten wahrscheinlich modernen Knorpelfischen. Vielleicht sahen sie ungefähr so aus wie Haie.

Aus solchen Überlegungen folgte für unsere eigenen Studien: Das Kameraauge und seine Fotorezeptoren hatten wohl noch tiefere Wurzeln. Also wandten wir uns den ursprünglicher gebauten kieferlosen Wirbeltieren zu, von denen ein paar wenige noch heute vorkommen. Diese urtümlichen Fische und wir haben einen gemeinsamen Vorfahren, der vor rund 500 Millionen Jahren lebte.

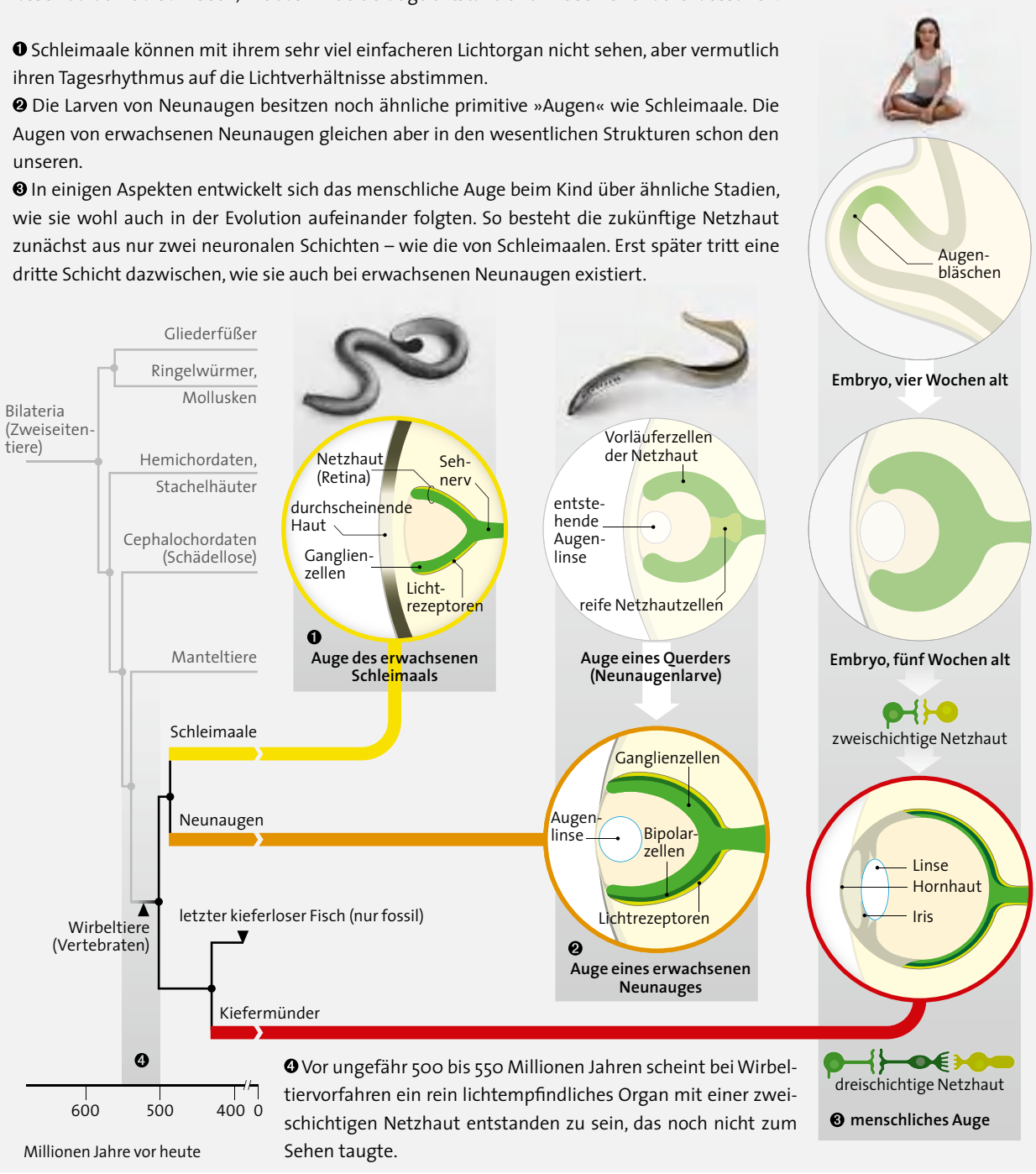
Für die erforderlichen detaillierten anatomischen Untersuchungen wählten wir Neunaugen. Die aalförmigen Geschöpfe mit einem kieferlosen Saugmund haben nur zwei Augen – ihrem Namen zum Trotz, welchen sie den beidseits hinter dem Auge aufgereihten je sieben Kiemenlöchern plus dem Nasenloch verdanken. Doch wir mussten erkennen: Auch Neunaugen besitzen schon ein komplettes, richtiges Kameraauge mitsamt Linse, Iris und sogar Muskeln, die in dem Fall von außen ansetzen und die Hornhautkrümmung verändern. Sogar die Netzhaut von Neunaugen weist Gemeinsamkeiten mit der unseren auf. Sie ist ebenfalls dreischichtig, da zwischen die Sinneszellen und die Neurone für den Sehnerv weitere Nervenzellen geschaltet sind, die eine Vorverarbeitung leisten. Und die Sehzellen ähneln stark unseren Zapfen. Allerdings haben Neunaugen anscheinend noch nicht die lichtempfindlicheren Stäbchen. Die Gene der uralten Fische belegen ebenfalls die Verwandtschaft: Ob es die Augenentwicklung beim einzelnen Tier betrifft, die Lichtperzeption oder die neuronale Verarbeitung – hinter vielen dieser Vorgänge und Strukturen stehen die gleichen Erbanlagen wie bei Kiefer tragenden Wirbeltieren.

Dermaßen zahlreiche Parallelen konnten nicht unabhängig voneinander entstanden sein. Der Ursprung des Wirbeltierauges musste darum sogar noch einiges weiter zurückliegen. Allem Anschein nach war er also schon vor über 500 Millionen Jahren bei gemeinsamen Vorfahren der kieferlosen und Kiefer tragenden Wirbeltiere zu suchen. Plausibel erschienen die vorangegangenen 50 Millionen Jahre.

Nachklänge der Entwicklungsgeschichte

Sehr urtümliche Wirbeltiere, einerseits die Schleimaale (Inger), andererseits die Neunaugen, lassen darauf rückschließen, wie das Wirbeltierauge entstand und wie seine Vorläufer aussahen.

❶ Schleimaale können mit ihrem sehr viel einfacheren Lichtorgan nicht sehen, aber vermutlich ihren Tagesrhythmus auf die Lichtverhältnisse abstimmen.
❷ Die Larven von Neunaugen besitzen noch ähnliche primitive »Augen« wie Schleimaale. Die Augen von erwachsenen Neunaugen gleichen aber in den wesentlichen Strukturen schon den unseren.
❸ In einigen Aspekten entwickelt sich das menschliche Auge beim Kind über ähnliche Stadien, wie sie wohl auch in der Evolution aufeinander folgten. So besteht die zukünftige Netzhaut zunächst aus nur zwei neuronalen Schichten – wie die von Schleimaalen. Erst später tritt eine dritte Schicht dazwischen, wie sie auch bei erwachsenen Neunaugen existiert.



❹ Vor ungefähr 500 bis 550 Millionen Jahren scheint bei Wirbeltiervorfahren ein rein lichtempfindliches Organ mit einer zweischichtigen Netzhaut entstanden zu sein, das noch nicht zum Sehen taugte.

JEN CHRISTIANSEN

Allerdings fragten wir uns nun, ob wir den Anfängen unseres Auges und seiner Sehzellen jemals auf die Schliche kommen würden. Eigentlich, so überlegten wir, müssten wir heutige Tiere untersuchen, deren Vorfahren sich im fraglichen Zeitraum von unseren Vorfahren abgespalten hatten. Doch es gibt keine lebenden Vertreter solcher Linien. Wir fanden dann aber andere primitive Fische, die uns weiterhalfen: die Schleimaale oder Inger, die mit den Neunaugen verwandt sind. Sie leben am Meeresgrund, auch in großer Tiefe, und ernähren sich von Krebsen, toten Fischen bis zu Walkadavern (siehe »Oasen der Tiefsee«, SdW 3/2011, S. 74). Bei Bedrohung sondern sie einen besonders zähen Schleim ab.

Zwar werden Inger den Wirbeltieren zugerechnet, aber sie besitzen nur ganz einfache Augen, falls man diese Organe

überhaupt so bezeichnen sollte. Hornhaut, Iris, Linse und Augenmuskeln sind nicht vorhanden. Die Netzhaut besteht nicht aus drei, sondern nur aus zwei Schichten. Obendrein liegen diese Augen tief eingebettet unter durchscheinender, unpigmentierter Haut. Nach Verhaltensbeobachtungen sind Schleimaale wohl praktisch blind. Nahrung spüren sie offenbar mit ihrem vorzüglichen Geruchssinn auf.

Nach Ansicht einiger Forscher könnte ein gemeinsamer Vorfahr von Ingern und Neunaugen ein komplizierteres Auge mitsamt Linse ähnlich dem von Neunaugen besessen haben. Dann würde das Auge der Schleimaale eine Rückbildung darstellen, ein Rudiment. Doch bezeichnenderweise ging dieses Organ nicht völlig verloren wie bei manchen – längst nicht allen – Höhlenfischen. Bei denen vollzog sich die Degeneration manchmal in nur 10000 Jahren. Aber die Inger behielten ihr primitives Auge über mehrere hundert Jahrmillionen. Für irgendetwas scheinen sie es demnach zu benötigen, wenn auch wohl nicht fürs Sehen.

Querder haben noch ähnlich primitive Augen wie Schleimaale

Ob dieses einfache Auge der Inger nun rudimentär ist oder nie komplizierter war – es könnte einiges über die Augenevolution erzählen. Denn auch falls es nur auf einer Rückbildung beruht, wäre denkbar, dass die Organentwicklung einst an irgendeiner Stelle anhielt, dass also manche embryonalen Entwicklungsschritte jetzt nicht mehr stattfinden. Mit der nötigen Vorsicht ließe sich dann aus dem Überbleibsel unter Umständen auf frühere Evolutionsstadien unseres Auges schließen. Solche Studien können somit Aufschluss darüber geben, wozu das unbekannte Augenvorläuferorgan diente und was es leistete.

Erste Hinweise hierauf lieferte uns die zweischichtige Netzhaut des Ingerauges. In der sonst für Wirbeltiere üblichen dreischichtigen Retina liegen in der mittleren Schicht unter anderem so genannte Bipolarzellen. Diese Neurone bearbeiten die Information, die von den Sehzellen kommt. Das Ergebnis reichen sie an Nervenzellen (so genannte retinale Ganglienzellen) weiter, die ihre Signale über den Sehnerv ins Gehirn schicken, den ihre langen Ausläufer bilden. Diese zwischengeschalteten Bipolarzellen sind bei Ingern nicht vorhanden. Stattdessen beliefern die Sinneszellen direkt die ins Gehirn führenden Neurone.

Diesbezüglich ähnelt das Verschaltungsmuster dem der Epiphyse oder Zirbeldrüse, auch Pinealorgan genannt. Die kleine Hormondrüse im Gehirn reguliert den inneren Tagesrhythmus. Bei allen Wirbeltieren enthält sie lichtempfindliche Zellen, mit Ausnahme der Säuger, bei denen die Eigenschaft verloren ging. Die Sinneszellen geben ihre Signale direkt – ohne Umschaltstation – an die weiterleitenden Neurone.

Wegen dieser Ähnlichkeiten äußerten meine Mitarbeiter und ich 2007 folgende Idee: Das Auge der Inger hat mit Sehen vielleicht gar nichts zu tun. Möglicherweise informiert es stattdessen spezifische Hirngebiete über die Tages- oder auch Jahreszeit, so dass die Tiere beispielsweise wissen, wann sie am besten fressen oder sich paaren sollen. Wir stellen uns vor, dass Urwirbeltiere vor 500 bis 550 Millionen Jahren mit ihren »Augen« noch gar nichts wirklich sahen, sondern nur Helligkeit registrierten. Erst später entstanden wirkliche Augen zum räumlichen Sehen mit allem, was dazu gehört – optischer Apparat, Augenmuskeln und neuronale Verarbeitung.

Für solch einen Ablauf der Evolution spricht in manchem auch die embryonale Entwicklung des Wirbeltierauges. Beziehungen zwischen der Evolutionsgeschichte und Abfolgen in der Individualentwicklung sollte man, wie wir heute wissen, zwar vorsichtig und erst nach genauen Analysen herstellen, doch sie können mitunter aufschlussreich sein.

Um mit den Neunaugen anzufangen: Sie leben jahrelang als blinde Larven, Querder genannt, bevor sie sich in geschlechtsreife Tiere verwandeln. Die Larven besitzen ganz ähnliche primitive, von Haut verdeckte »Augen« wie Schleimaale. Erst während der Metamorphose zum erwachsenen Tier bilden sich eine dreischichtige Netzhaut, Linse, Hornhaut und Augenmuskeln. Das Auge wird nun deutlich größer und tritt als das typische Kameraauge der Wirbeltiere an die Oberfläche. Unseres Erachtens könnten sich in dieser Abfolge bestimmte Evolutionsstadien spiegeln.

Ebenso aufschlussreich erscheint die Embryonalentwicklung eines Säugerauges. Wie Benjamin E. Reese und seine Mitarbeiter von der University of California in Santa Barbara herausfanden, gleichen die neuronalen Verschaltungen in der Netzhaut eines jungen Säugetiers zunächst ziemlich denen bei Schleimaalen: Die lichtempfindlichen Sinneszellen haben direkten Kontakt mit den ableitenden Neuronen. Erst später reifen Bipolarzellen heran und drängen sich dazwischen. Diese Reihenfolge würde man sich auch für die Evolution vorstellen, sofern die komplexe Netzhaut der Wirbeltiere aus einer zweischichtigen Struktur zum Erfassen des Tagesrhythmus entstand. Somit könnte das »Auge« der Schleimaale wirklich eine frühere Evolutionsstufe darstellen, bevor sich der optische Apparat mit einer Linse entwickelte.

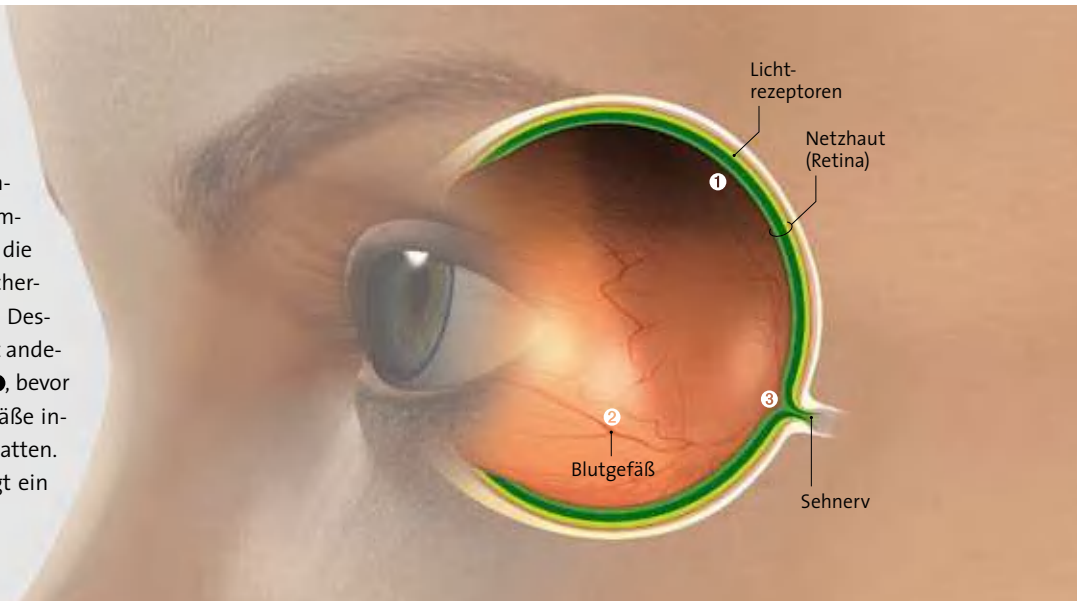
Ungewöhnliche Sehzellen für Säugetiere

Zur Entstehungsgeschichte der verschiedenen Augen im Tierreich gehört auch die Evolution ihrer unterschiedlichen Fotorezeptoren. Biologen unterscheiden zwei Klassen dieser Sinneszellen: einen rhabdomeren und einen ziliären Typ. Die beiden Typen unterscheiden sich im Aufbau und in den physiologischen Prozessen. Noch vor Kurzem glaubten viele Forscher, die wirbellosen Tiere würden rhabdomere Rezeptoren benutzen und die Wirbeltiere ziliäre Zellen. Doch die Sachlage erweist sich als wesentlich komplizierter.

Denn bei den allermeisten Organismen, auch bei wirbellosen Tieren, sind für die reine, nichtvisuelle Lichtwahrnehmung – etwa für den Tag-Nacht-Rhythmus – ziliäre Fotorezeptoren zuständig. Dagegen dienen rhabdomere Sinneszellen dort, wo sie vorkommen, allein dem richtigen, abbildhaften Sehen. Sie bestücken beispielsweise die Fassettenaugen von Insekten und anderen Gliederfüßern – und

Narben der Evolution

Konstruktionsfehler unseres Auges gehen auf seine Evolutionsgeschichte zurück und auf die damit in mancher Hinsicht zusammenhängende Embryogenese. Beim Embryo entsteht die Netzhaut aus einem sich später becherförmig einstülpenden Hirnbläschen. Deswegen muss einfallendes Licht zuerst andere Netzhautschichten durchqueren ❶, bevor es auf die Sinneszellen trifft. Blutgefäße innen auf der Netzhaut ❷ werfen Schatten. Dort, wo der Sehnerv anfängt ❸, liegt ein »blinder Fleck«.



DON FOLEY

stellen die Sehzellen im Kameraauge der Tintenfische, das unserem Auge oberflächlich ähnelt. Die Wirbeltiere aber benutzen zum Sehen ziliäre Rezeptoren.

Allerdings lieferte Detlev Arendt vom European Molecular Biology Laboratory in Heidelberg 2003 Hinweise darauf, dass auch unser Auge in der Netzhaut anscheinend noch Abkömmlinge von rhabdomeren Fotorezeptoren aufweist. Sie haben sich jedoch offenbar stark abgewandelt und sind zu den Neuronen (retinalen Ganglienzellen) geworden, deren lange Ausläufer den Sehnerv bilden. Somit blieben die ziliären Zellen Lichtrezeptoren, haben jedoch ihre Funktion erweitert – während die ursprünglich rhabdomeren Sinneszellen bei den Wirbeltieren eine neue Aufgabe übernommen haben. Dergleichen kommt in der Evolution öfter vor. Diese Prozesse beim Auge genauer zu ergründen, kann helfen, die Konstruktion unseres durchaus nicht perfekten Sehorgans besser zu verstehen. Also fragten wir uns, welche Umwelt–zwänge einst jene gravierenden funktionellen Veränderungen bewirkt haben mögen.

Lichtsinneszellen besitzen Sehfarbstoffe, mit denen sie Licht einfangen. Als Proteinanteil enthalten die hier interessierenden Fotopigmente ein Opsin, weshalb einige wichtige von ihnen Rhodopsine genannt werden. Laut einer Arbeit von Yoshinori Shichida von der Universität Kioto und seinen Kollegen von 2004 scheint sich ein solches Pigment bei frühen Wirbeltieren derart verändert zu haben, dass es nach Anregung durch Licht in einer stabileren Form vorlag als vorher, was zugleich seiner Aktivität – und somit der Sinnesreaktion – zugutekam. Ich vermutete damals, wegen dieser neuen Form könnte die Rückführung des Pigments in den inaktiven Ausgangszustand blockiert sein, in dem der Rezeptor erst neuerlich einsatzbereit ist. Sehfarbstoffe von rhabdomeren Zellen absorbieren zu dem Zweck einfach nochmals Licht. Doch die Fotozellen der Wirbeltiere benötigten wohl eine andere biochemische Lösung – über die heutige Organismen tatsächlich verfügen.

Nachdem so die ziliären Sehzellen wieder zurückschalten konnten, erwiesen sie sich den rhabdomeren Rezeptoren in lichtarmer Umwelt überlegen. Damit ausgestattete Tiere mögen etwa in der Tiefsee besser zurechtgekommen sein. Vielleicht konnten Vorfahren der Wirbeltiere deswegen manche Lebensräume besiedeln, die damals Tieren mit rhabdomeren Lichtrezeptoren verwehrt blieben. Das betraf allerdings zu der Zeit nicht wirkliches Sehen, denn Kameraaugen besaßen diese Tiere noch keineswegs. Aber sie vermochten sich nun bei sehr wenig Licht auf Tages- und Jahreszeiten einzustellen.

Embryonalentwicklung liefert Indizien

Gleichzeitig verloren die weniger lichtempfindlichen, in diesen Augen auch noch vorhandenen rhabdomeren Zellen in der neuen schummerigen Umwelt ihre Funktion als Fotorezeptoren, denn damit konnten jene frühen Tiere dort praktisch nichts mehr wahrnehmen. So wurden diese Zellen zu Neuronen umfunktioniert, die dem Gehirn die visuellen Signale überbringen. Dabei verloren sie den Sehfarbstoff – zumindest die meisten von ihnen (siehe »Das zweite Auge«, SdW 12/2011, S. 26).

Wie aber wurde vor rund 500 Millionen Jahren aus solch einem schlichten Lichtorgan das zum Sehen befähigte Wirbeltierauge mit all seinen Finessen? Nachdem wir uns vorstellen konnten, woher die Bestandteile der Netzhaut kamen, wollten wir auch diesen Prozess genauer ergründen. Wiederum liefert die Embryonalentwicklung Hinweise (siehe Kasten S. 25, rechte Spalte).

Beim Wirbeltierembryo wachsen seitlich aus dem späteren Zwischenhirn schon früh zwei neuronale Augenbläschen, die sich dann becherförmig einstülpen und eine zunächst zweischichtige Retina hervorbringen, die das werdende Auge innen auskleidet. Es erscheint gut möglich, dass in der Evolution ähnliche Schritte abliefen. Bei Wirbeltiervorfahren könnte so vor 500 bis 550 Millionen Jahren ein Organ

mit zweischichtiger Netzhaut entstanden sein, wobei die Lichtrezeptoren auf der Außenseite des Auges, also nach hinten, lagen und die ableitenden Ganglienzellen dem Augeninneren zu, also vorn. Somit erklärt sich die »verkehrte« Anordnung der Netzhautschichten in unserem Auge aus diesem Werdegang, das heißt aus der Herkunft von einer Gehirnausstülpung, die sich dann nachträglich nach innen stülpte.

Die Ganglienzellen jenes urtümlichen Auges, die den Sehnerv hervorbrachten, stammten wie gesagt von rhabdomeren Sinneszellen ab und die Rezeptoren für Licht von ziliären Zellen. Dieses Organ diente anfangs wohl immer noch hauptsächlich zur Abstimmung der inneren Uhr auf Hell-dunkel-Wechsel. Vielleicht nahmen Tiere damit aber auch schon schattenhafte Konturen wahr, an denen sie sich orientierten.

Im Evolutionsmaß ein Augenblick

Wenn sich beim Embryo die spätere Netzhaut zum Augenbecher einstülpt, entsteht an dessen »Öffnung« die Linse – und zwar aus der darüberliegenden Haut: Die Stelle vor dem Augenbläschen verdickt sich, diese Struktur wandert etwas nach innen, schnürt sich schließlich von der Haut ab und bildet die quasi frei schwimmende Linse. Eine in manchem ähnliche Abfolge könnte es in der Evolution gegeben haben. Beim Embryo greifen allerdings Einstülpung des Augenbechers und Linsenbildung zeitlich ineinander. In der Evolution mag beides nacheinander geschehen sein – vielleicht ein Beispiel dafür, dass die Individualentwicklung die Stammesgeschichte nicht zwangsläufig und in allen Einzelheiten spiegelt.

Wann das erste richtige – sehende – Auge dieser Art entstand, wissen die Biologen nicht. Nach Berechnungen von Dan-Eric Nilsson und Susanne Pelger von der Universität Lund (Schweden) von 1994 könnten alle optischen Komponenten des Wirbeltierauges in nicht einmal einer Million Jahren zusammengekommen sein. Falls diese Entwicklung tatsächlich so schnell erfolgte, wäre aus dem praktisch blinden Vorläuferorgan in nur einem evolutionären Augenblick das Auge fürs Bildsehen entstanden.

Die lichtbrechende Linse – genauer gesagt der gesamte lichtbrechende Apparat – fokussierte nun Abbilder der Außenwelt auf die Netzhaut und ermöglichte dem Auge dadurch eine viel bessere Informationsaufnahme. Sicherlich erzeugte diese Situation wiederum neue Selektionsdrücke für eine leistungsfähigere Signalverarbeitung schon in der Netzhaut. Bisher hatten die Fotorezeptoren ihre Signale direkt den Sehnervzellen geliefert. Nun aber entwickelten sich einige aus ihrer Fraktion nicht mehr zu ziliären Rezeptoren wie ihre Schwestern, sondern wurden Bipolarzellen und schoben sich – als dritte Retinaschicht – zwischen die Sinneszellen und die Sehnervneurone. Ihre Herkunft erklärt, wieso die Bipolarzellen den Stäbchen und Zapfen so sehr ähneln – nur dass sie kein Rhodopsin besitzen und selbst nicht auf Licht ansprechen, vielmehr chemische Signale von den Lichtsinneszellen empfangen.

Im Prinzip würde solch ein Kameraauge ein Sichtfeld von ungefähr 180 Grad erlauben. Aber davon nehmen wir nur einen kleinen Ausschnitt auf einmal wahr, denn so viel Information kann der Sehnerv wegen seiner begrenzten Anzahl an Nervenfasern nicht gleichzeitig ins Gehirn schicken. Bestimmt waren die ersten Linsenaugen noch stärker eingeschränkt. In dieser Situation dürften kräftige Selektionsdrücke für eine äußere Augenmuskulatur, mit der die Augäpfel bewegt werden konnten, aufgetreten sein. Offenbar existierten solche Muskeln bereits vor 500 Millionen Jahren. Sie sind schon bei den Neunaugen fast genauso angeordnet wie bei den Kiefer tragenden Wirbeltieren.

Bei aller Leistungsfähigkeit ist unser in vielem so genial erscheinendes Auge keineswegs perfekt. Als Konstruktion wirken einige Details sogar stümperhaft. Die Netzhaut etwa liegt wie gesagt verkehrt herum: Bis das Licht die Sinneszellen erreicht, muss es erst die anderen neuronalen Zellschichten mitsamt all den lichtstreuenden Zellkörpern und Nervenfasern passieren, was die Bildqualität verschlechtert, gar nicht zu reden von Blutgefäßen, die ihre Schatten auf die Sinneszellen werfen. Und an der Stelle, wo sich Nervenfasern bündeln, die Netzhaut durchqueren und dann hinter der Retina als Sehnerv erscheinen, sehen wir gar nichts.

Dass ein linsenbewehrtes Kameraauge nicht zwangsläufig so ungeschickt aufgebaut sein muss wie unseres, beweist das Tintenfischauge, das diese Unzulänglichkeiten nicht aufweist. Erst von der Evolution her lässt sich verstehen, wieso unser Auge bestimmte Mängel hat. Jeder einzelne Evolutionsschritt bedeutete für frühe Wirbeltiere oder deren Vorläufer eine vorteilhafte Anpassung. Darum trägt unser Auge heute noch Merkmale von seinen Vorgängern aus Urzeiten, mit denen Tiere überhaupt nicht sehen konnten.

DER AUTOR

Trevor D. Lamb forscht an der Australian National University in Canberra. Der Sinnesphysiologe und ausgebildete Elektroingenieur arbeitet dort an der John Curtin School of Medical Research im Institut für Neurowissenschaften und am ARC Center of Excellence in Vision Science.

QUELLEN

Lamb, T. D. et al.: Evolution of the Vertebrate Eye: Opsins, Photoreceptors, Retina and Eye-Cup. In: Nature Reviews Neuroscience 8, S. 960–975, 2007

Lamb, T. D. et al.: The Evolution of Phototransduction and Eyes. In: Philosophical Transactions of the Royal Society B 364, S. 2789–2967, 2009

The Evolution of Eyes. Verschiedene Aufsätze. Sonderband von: Evolution: Education and Outreach 1, S. 351–516, 2008

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1135748**

ZOOLOGIE

Die Tricks der Fühlerschlange

Eine kleine Wasserschlange überrumpelt ihre Beute mit höchst ausgeklügelten Techniken – und in atemberaubendem Tempo. Solche Raffinessen beherrscht sie schon von Geburt an.

Von Kenneth C. Catania

Der Name sagt es: Fühlerschlangen tragen vorn am Maul zwei Tentakel. Dieses Tier züngelt gerade.

Wir Menschen bilden uns viel auf unser überragendes Gehirn ein. Aber als Biologe hüte ich mich inzwischen davor, die Hirnleistungen anderer Geschöpfe zu unterschätzen, und mögen es angeblich noch so primitive, dumme Tiere sein. Oft haben mir Säugetiere hier schon verblüffende Lektionen erteilt, wie der Sternmull (siehe meinen Artikel »Die schnellste Nase der Welt«, SdW 12/2002, S. 54). Doch jetzt brachte mich ein kleines Reptil zum Staunen: die Tentakel- oder Fühlerschlange aus Südostasien.

Erpeton tentaculatus (teils auch als *E. tentaculatum* bezeichnet) lebt in Gewässern Thailands, Kambodschas und Südvietnams. Die Tiere werden 70 bis 90 Zentimeter lang, sind lebend gebärend und ernähren sich fast ausschließlich von Fischen. Das Auffälligste an dieser kleinen Schlange sind die beiden beschuppten, an Fühler erinnernden Fortsätze oben beidseits des Mauls, eine Besonderheit dieser Art.

Zum ersten Mal fiel mir das seltsame Reptil auf, als ich vor zehn Jahren wieder einmal den Washingtoner »National Zoo« besuchte, wo ich als Student oft gejobbt hatte. In einem ziemlich zugewucherten Aquarium im Reptilienhaus lag solch eine Schlange reglos im Wasser. Man konnte sie fast für einen Pflanzenstängel halten. Genauer gesagt ähnelte sie einem vorn J-förmig gebogenen Stöckchen – die typische Lauerstellung einer hungrigen Fühlerschlange. Ich fragte mich damals, wozu ihr die beiden eigenartigen Tentakel vorn am Kopf wohl dienen mochten. Ob sie damit vielleicht Beute aufspürt? Doch als ich später die wissenschaftliche Literatur durchforstete, fand ich dazu nichts als ein paar Vermutungen. Offenbar hatte noch niemand diese Frage experimentell untersucht. Also nahm ich die Sache in Angriff.

Bei diesen Studien überraschten mich die Fühlerschlangen bald in unerwarteter Weise. Denn nicht nur die beiden Anhängsel am Maul entpuppten sich tatsächlich als einzigartige Hilfsinstrumente zum Fressen. Das Reptil beherrscht, wie ich bald entdeckte, auch mehrere unglaubliche Tricks, um Fische zu fangen. Da das bereits frisch geborenen, erst wenige Zentimeter langen Schlangen gelingt, kann dieses komplizierte Verhalten nicht gelernt sein. *Erpeton tentaculatus* liefert somit ein eindrucksvolles Beispiel dafür, dass die Evolution mitunter höchst aufwändige Verhaltensweisen hervorbringt.

Doch anfangs wollte ich ja nur herausfinden, ob die Kopfanhängsel wirklich Fühler darstellen – also dem Tier in irgendeiner Weise zur Orientierung dienen, wie ich vermutete. Dazu musste ich zunächst genauestens beobachten, wie die Tentakelschlangen überhaupt jagen. Das war allerdings schwierig, denn sie – und auch ihre Opfer – bewegen sich dabei unglaublich fix: Eine Attacke, einschließlich Fluchtreaktion des Fischs und kompletten Verschlingens der Beute, dauert gewöhnlich nur rund 40 Millisekunden: eine fünfundzwanzigstel Sekunde. Ich musste eine Hochgeschwindigkeitskamera zu Hilfe nehmen. Damit filmte ich eine Reihe von Schlangen wieder und wieder mit 500 bis 2000 Bildern pro Sekunde beim Fressen.

Als ich diese Filme in Zeitlupe auswertete, wunderte ich mich, dass die doch eigentlich flüchtenden Fischchen recht oft direkt auf das Schlangenmaul zuschwammen und nicht selten sogar geradewegs hineinflitzten. Nun haben Fische eine Menge Feinde und stehen bei vielen räuberischen Arten ganz oben auf der Beuteliste. Entsprechend sind sie eigent-

AUF EINEN BLICK

HINTERLISTIGER KILLERINSTINKT

1 Die Fühlerschlange, eine kleine, für den Menschen nur schwach giftige Wasserschlange, lebt in Südostasien und ernährt sich von Fischen. Äußerlich fallen ihre beiden **Tentakel** seitlich vor dem Maul auf – sie zeichnen diese Art aus.

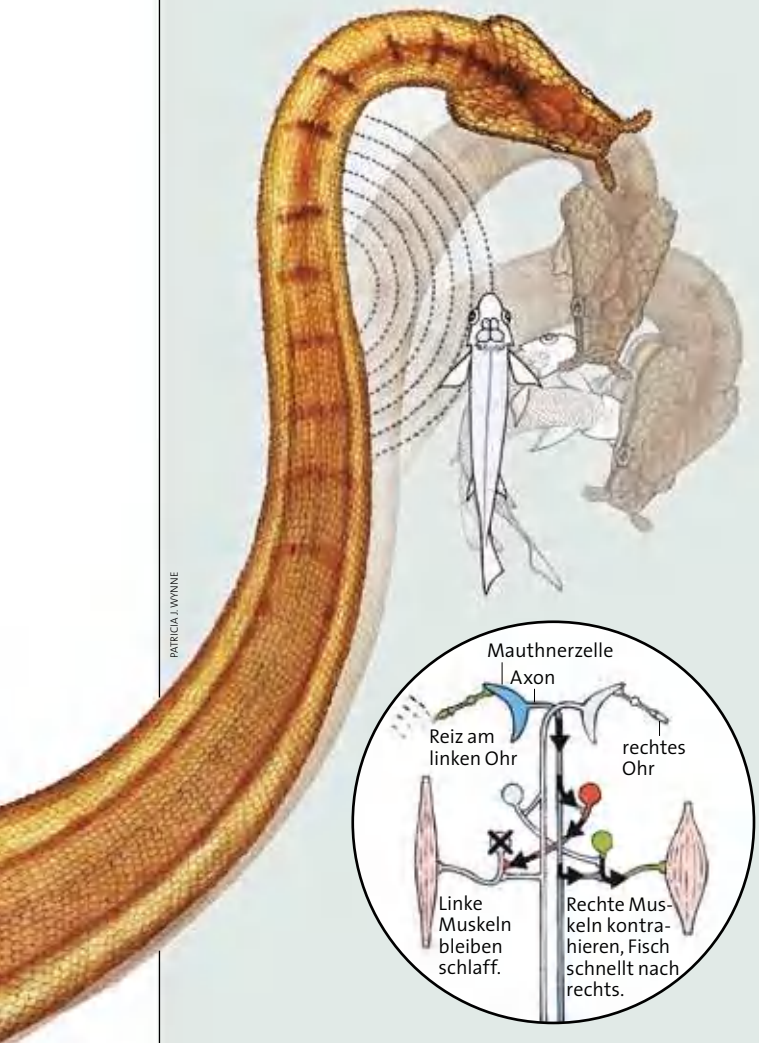
2 Die beiden Fühler vorn am Kopf dienen zur **Ortung von Beutefischen**. Mit ihrer Hilfe kann sich das Reptil, das meist reglos im Wasser lauert, selbst unter schlechten Sichtverhältnissen Nahrung beschaffen.

3 Zudem bedient sich die Schlange angeborener, höchst ausgefeilter Fangmethoden. Erst **hochfrequente Filmaufnahmen** zeigten, wie sie den Fluchtreflex von Fischen ausnutzt, damit sich die Beute selbst direkt in ihr Maul befördert.

Den Fluchtreflex ausgenutzt

Fühler- oder Tentakelschlangen lauern ihrer Beute mit im Bogen gekrümmtem Vorderkörper auf, wobei sie reglos wie ein Pflanzenstängel im Wasser treiben. Für Beutefische ist das eine Falle. Durch eine Zuckung gegenüber ihrem Kopf erzeugt die Schlange eine Druckwelle, die den Fisch reflexhaft flüchten lässt. Die Fluchtrichtung ist von der Schlange so berechnet, dass das Opfer auf ihr Maul zuschwimmt.

Noch unglaublicher sind ihre Fangmethoden, wenn der Fisch in ungünstiger Position zum Schlangenkopf steht. Auch dann schickt das Reptil das Opfer in die Flucht – doch es berechnet die Fluchtrichtung voraus und stößt mit dem Kopf schon vorher an die richtige Stelle vor (Zeichnung).



PATRICIA J. WYNNE

Dank ihres Fluchtreflexes können Fische blitzschnell entfliehen. Die beiden riesigen Mauthnerzellen in ihrem Hirnstamm sorgen dafür. Diejenige von ihnen, die zuerst erregt wird, löst den so genannten C-Start aus: Der Fisch krümmt sich sofort von der Gefahr weg und flitzt davon. Dieses Verhalten berechnen Fühlerschlangen bei ihren Attacken ein.

lich bestens dafür gerüstet, bei Gefahr blitzschnell zu reagieren und zu fliehen. Wenn ein Geräusch oder eine Wasserbewegung sie aufschreckt, setzt ihr Fluchtreflex schon nach sechs bis sieben Millisekunden ein. Typischerweise machen sie dabei einen so genannten C-Start: Sie biegen den Körper sogleich direkt von der Gefahrenrichtung weg und schnellen dann fort. Wieso liefern sie sich den Fühlerschlangen trotzdem regelrecht aus?

Fallenbau mit dem eigenen Körper

Das Reptil, so entdeckte ich schließlich, stellt ihnen eine Falle – mit seinem eigenen Körper. Es attackiert nämlich hauptsächlich Fische, die sich gerade im Halbrund der J-Biegung von Kopf und Vorderkörper der Schlange aufhalten. Die sorgfältige Analyse der Filmaufnahmen ergab: Unmittelbar bevor die bis dahin reglose Schlange zuschnappt, zuckt bei ihr eine Körperpartie, die genau in Verlängerung der Linie von ihrem Maul zum Opfer liegt – also auf der von ihrem Kopf abgewandten Seite des Fischs. Dieser nimmt die vom Zucken ausgelöste Druckwelle wahr und flieht sofort vor der vermeintlichen Gefahr in die entgegengesetzte Richtung, somit direkt auf das offene Schlangenmaul zu. Dass die Druckwelle stark genug ist, um einen Fisch zu erschrecken, konnte ich mit einem Mikrofon nachweisen, mit dem ich das Geräusch unter Wasser aufzeichnete, während ich die Szene gleichzeitig mit einer Auflösung von 2000 Bildern pro Sekunde filmte.

Das Täuschungsmanöver der Schlange ist deswegen so tückisch, weil es ausgerechnet den natürlichen Fluchtreflex von Fischen ausnutzt, der bereits nach wenigen Millisekunden einsetzt. Dieser basiert auf einem eigentlich höchst hilfreichen neuronalen Schaltkreis, der dafür sorgt, dass sich der Fisch von der Gefahr zur Seite wegbiegt und in dieser Richtung davonschnellt (siehe Verschaltungsschema im Kasten links). Dabei treten die beiden so genannten Mauthnerzellen in Aktion, zwei auffallend große Neurone im Hirnstamm von Fischen und auch Amphibien, je eins auf der rechten und auf der linken Seite. Sie heißen nach ihrem Entdecker, dem österreichischen Forscher Ludwig Mauthner (1840–1894). Ob ein Fluchtreflex erfolgt und nach welcher Seite hin er gerichtet ist, machen die beiden riesigen Hirnzellen unter sich aus. Es gewinnt immer diejenige, die nach einem Reiz zuerst erregt wird – und das ist normalerweise jene auf der Gefahrenseite. Etwaige spätere Befehle der anderen Zelle werden dann sofort automatisch unterdrückt.

Kommt die Gefahr von links – zum Beispiel weil das linke Ohr ein Geräusch zuerst wahrnimmt –, registriert also die linke Mauthnerzelle die Meldung zuerst. Sie schickt daraufhin unverzüglich ein Signal an die motorischen Neurone der rechten Körperhälfte, denn das Axon (der weiterleitende Fortsatz) einer Mauthnerzelle kreuzt jeweils auf die andere Seite des Gehirns. Die erregten Motoneurone veranlassen sogleich die Muskeln der rechten Körperflanke, sich kräftig zusammenzuziehen. Gleichzeitig verhindern hemmende Nervenzellen, die zurück nach links kreuzen, dass Muskeln der linken Seite kontrahieren. Durch diesen ausgeklügelten,

strengen Reflex kann der Fisch gar nicht anders als nach rechts davonschnellen. Pech hat er nur, wenn genau in seiner Fluchtrichtung ein Schlangenmaul wartet. Er könnte die Reaktion im Übrigen gar nicht mehr korrigieren – das verhindern die automatischen Hemmsignale.

Die besondere Weise, wie Fühlerschlangen ihre Beute überwältigen, erklärt manche früheren, bisher unverstandenen Beobachtungen. Zum Beispiel wunderte sich 1999 John C. Murphy vom Field Museum of Natural History in Chicago darüber, wie unglaublich schnell die Schlange frisst. Er filmte sie dabei mit 30 Bildern pro Sekunde. Mitunter war ein Fisch schon von einem Bild zum nächsten spurlos verschwunden – und die Schlange wirkte, als wäre nichts gewesen. Schlangen können Fische am raschesten mit dem Kopf voran verschlingen. Meine Aufnahmen beweisen, dass ebendies Fühlerschlangen meistens gelingt. Auf den Bildern ist deutlich zu sehen: Auch wenn das Opfer dem Reptil nicht geradewegs ins Maul flitzt, bringt es sich durch die reflexartige Kehrtwende doch meist in eine Position, bei der es Kopf voran verschluckt wird.

Die hohe Geschwindigkeit dürfte nicht nur eine größere Anzahl von Beuteschlägen in kurzer Zeit erlauben – solche äußerst rasch beendeten Attacken erhöhen sicherlich auch die Tarnwirkung als scheinbar regloses Stöckchen, sowohl für die nächsten Opfer als auch die eigenen Fressfeinde. Andere bislang arglose potenzielle Beutefische in der Nähe sollten schließlich von dem ganzen Vorgang möglichst überhaupt nichts bemerken, genauso wenig wie die vielen größeren Räuber, die es in dem Lebensraum auch gibt.

Gemäß einem Motto des amerikanischen Psychologen Burrhus F. Skinner (1904–1990): »Lass alles andere stehen und liegen, wenn dir irgendwo etwas richtig Interessantes unterkommt«, schob ich zunächst die Studien über die Fühler zur Seite und erforschte stattdessen den Beutefang von Tentakelschlangen genauer. Wie vielseitig dieses Reptil ist und wie gut es verschiedene Situationen austariert, hatte ich allerdings nicht erwartet.

Gut geplant ist halb gefangen

Die eben beschriebene Fangmethode – bei der das Opfer dem praktisch reglosen Räuber mehr oder weniger direkt ins Maul schwimmt, ohne dass der seinen Kopf groß bewegen muss – funktioniert nur, wenn sich der Fisch sozusagen im Brennpunkt des von der Schlange geformten Bogens aufhält und dabei außerdem etwa parallel zu den Kiefern des Räubers ausgerichtet ist. Dann vermag ihn die Schlange so zu erschrecken, dass er genau auf ihr Maul zu abdreht. Einen Fisch, dessen Kopf schon vorher zu ihrem eigenen weist, kann sie aber nicht auf die gleiche Weise schnappen – er würde im Reflex nach rechts oder links ausbrechen. Für solche Fälle hat sie eine andere, noch eindrucksvollere Lösung parat (dargestellt in der Zeichnung im Kasten links): Sie berechnet Fluchtrichtung und -geschwindigkeit des Opfers im Voraus und schnellt mit dem Kopf zeitlich passend so vor und herum, dass sie dem Flüchtling den Weg abschneidet. Auch in dieser Situation veranlasst sie zuerst mit einem Körperzucken einen Fluchtreflex weg von sich selbst. Das bringt den Fisch diesmal parallel zu ihrer Ausgangskopfhaltung. Aber schon bevor dieser sich überhaupt bewegt, stößt der Schlangenkopf bereits vor – und erwischt dann, wenn alles gut geht, den flüchtenden Fisch wiederum genau am Kopf.

KENNETH C. CATANIA

Die beschuppten Fühler der Tentakelschlange sind im Rasterelektronenmikroskop deutlich zu erkennen. Sie sind hervorragende Ortungsorgane für geringe Wasserbewegungen – und somit hochsensible Fischdetektoren.

So schnell, wie das Ganze geschieht, kann die Schlange unmöglich eine visuelle Rückmeldung über den wegschwimmenden Fisch einbeziehen. Ihr Bewegungsablauf in dieser Situation scheint demnach zuvor geplant zu sein. Dass dem tatsächlich so ist, zeigt sich, wenn der Fisch im Experiment einmal nicht die übliche Fluchtrichtung einschlägt. Die Attacke zielt dann trotzdem genau auf eine bestimmte Stelle der normalen Fluchtlinie – und somit ins Leere.

Also führen die Angriffstricks nicht zwangsläufig in jedem Fall zum Erfolg. Manchmal schnappt die Schlange auch einfach nur zu, wenn sie sich das Opfer nicht vorher durch ein Körperzucken zutreiben kann. Meistens allerdings lauern Fühlerschlangen darauf, dass ein Fisch in die Falle geht, die sie mit ihrem Vorderkörper bilden. In dem Zusammenhang

MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de

Die raffinierte Fangtechnik der Fühlerschlange im Video:

www.spektrum.de/fuehlerschlange

KENNETH C. CATANIA

Eine Fühlerschlange scheut keine Verrenkungen, um einen Fisch von vorn zu erwischen – die praktischste und vor allem schnellste Fressmethode.

beobachtete ich noch mehrere andere bemerkenswerte Angriffsweisen mit offenbar vorher feststehendem Ablauf. Bei einer besonders akrobatischen Variante verdreht das Reptil seinen Kopf unter seinen eigenen Körper. Auch so erwischt es manches davonflitzende Opfer von vorn.

Erpeton tentaculatus beherrscht demnach verschiedene Fangstrategien und wählt jeweils die zur Situation passende. Wir fragten uns, ob eine Tentakelschlange solche Finessen erst mühsam lernen muss oder ob sie schon mit den passenden Verhaltensprogrammen geboren wird. Glücklicherweise bekamen einige unserer Tiere Junge. Als wir den unerfahrenen Nachwuchs, der anfangs nur zwei oder drei Zentimeter misst, beim Fischefangen filmten, zeigte sich klar: Fühlerschlangen können von Geburt an vorausberechnen, wohin der getäuschte Fisch sich normalerweise wenden wird, und richten ihre Attacke dorthin. Sowohl die Einschätzung des Fluchtwegs eines aufgeschreckten Fischs als auch die jeweils beste Überrumpelungstaktik für eine Situation ist ihnen anscheinend angeboren. Sogar Fangschläge mit unter den Körper gewundenem Kopf beobachteten wir schon bei den unerfahrenen Jungschlangen.

Schnelligkeit als Tarnstrategie

Wenn ein Tier ohne jede Lernerfahrung über derart raffinierte Verhaltensabläufe verfügt, spricht das für eine längere evolutionäre Vorgeschichte. Bei den Fühlerschlangen muss sich dieses Verhalten in seinen verschiedenen Formen über viele Generationen Fische fangender Vorfahren herausgebildet haben, wobei die Attacken immer findiger wurden. Wir wissen zwar aus unseren Versuchen, dass eine Tentakelschlange durchaus auch aus Vorkommnissen lernen kann, doch die einzelnen Fangstrategien dürften ihr grundsätzlich angeboren sein. Insbesondere die noch unerfahrenen Jungtiere sind von Anfang an auf rasches, effektives Beuteschlagen angewiesen, das in der Umgebung möglichst kein Aufsehen erregt. Unauffälligkeit steigert ihre Überlebenschancen. Im Grunde nutzt die Tentakelschlange einfach einen angeborenen Reflex von Fischen aus – den C-Start. Daran hat sie sich während ihrer Evolution hochpräzise angepasst. Die Fluchtrichtung eines Fischs ist vorhersagbar, wenn klar ist, woher der Schreckreiz kommt – und danach richtet sich die Schlange. Wer sich nun fragt, wieso denn die Fische nicht ihrerseits evolutionäre Gegenanpassungen hervorgebracht haben, dem sei mit dem amerikanischen Evolutionsforscher Stephen Jay Gould (1941–2002) geantwortet: Ein bestimmter Feind kann ein Schutzverhalten der potenziellen Beute für seine Zwecke verwenden, ohne dass die Beutetiere spezielle Maßnahmen gegen ihn entwickeln würden – sofern er selten genug vorkommt. Vor den meisten anderen Feinden hilft der C-Start auf einen Schreckreiz hin Fischen ja wirklich zu entkommen.

Und was ist mit den auffälligen Fühlern dieser Schlange? Über ihre Funktion haben meine Mitarbeiter Duncan Leitch, Danielle Gauthier und ich ebenfalls einiges herausgefunden. Die beiden Anhängsel stecken, wie wir erkannten, voller feiner Nervenendigungen. Anatomische und neurophysiologische Studien und Gehirnkartierungen erwiesen, dass sie höchst empfindliche Tast- oder Fühlorgane – Mechanorezeptoren – darstellen. Mit ihnen erkennt das Reptil an leichten Wasserbewegungen genau, wo sich etwas in der Nähe bewegt.

Zwar haben Fühlerschlangen offenbar sehr gute Augen und erkennen damit Beutefische. Doch sie können auch im Dunkeln, wenn sie nichts mehr sehen, ihre Opfer orten und erfolgreich zuschlagen. Als wir die Tiere nur bei Infrarotlicht filmten, das sie nicht wahrnehmen, erwischten sie die Fische trotzdem – sicherlich mit Hilfe der Tentakel. Das dürfte ihnen nachts und in trübem Wasser beim Jagen helfen, während sie sonst wohl Fühler und Augen zusammen einsetzen. ~

DER AUTOR

Kenneth C. Catania ist Professor für Biowissenschaften an der Vanderbilt University in Nashville (Tennessee). Der Neurobiologe erforscht hauptsächlich Sinnessysteme verschiedener Tiere.

QUELLEN

Catania, K.C.: Tentacled Snakes Turn C-Starts to Their Advantage and Predict Future Prey Behavior. In: Proceedings of the National Academy of Sciences USA 106, S. 11183–11187, 7. Juli 2009

Catania, K.C.: Born Knowing: Tentacled Snakes Innately Predict Future Prey Behavior. In: PLoS One 5, e10953, 16. Juni 2010

Catania, K.C. et al: Function of the Appendages in Tentacled Snakes *(Erpeton tentaculatus)*. In: Journal of Experimental Biology 213, S. 359–367, Februar 2010

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1124677**

Die vielen Fassetten der **Aufmerksamkeit**

Ein viel bemühter Begriff harrt noch immer seiner wissenschaftlichen Klärung. Fest steht jedoch: Hinter »Aufmerksamkeit« verbirgt sich ein kompliziertes Puzzle ganz unterschiedlicher kognitiver Teilleistungen.

Von Reinhard Werth

Nach einem anstrengenden Arbeitstag fährt Herr S. mit dem Auto nach Hause. Er nimmt seine übliche, vertraute Strecke und lässt im Geist noch einige Ereignisse des Tages Revue passieren. Plötzlich schrecken ihn Hupen und das Geräusch blockierender Räder auf. Er sieht gerade noch, wie ein Fahrzeug auf ihn zurast. Später wird ihm unerklärlich sein, wie er das Stoppschild und das andere Auto übersehen konnte. Vor Gericht wird man ihm vorwerfen, er habe dem Straßenverkehr nicht genügend Aufmerksamkeit geschenkt und sei schuld an dem Unfall.

Doch was heißt hier eigentlich »Aufmerksamkeit«? In den letzten Jahrzehnten hat sich bei Untersuchungen von Gesunden, von Heranwachsenden mit Aufmerksamkeitsstörungen und von hirngeschädigten Patienten gezeigt: Was wir alltagssprachlich als Aufmerksamkeit bezeichnen, setzt sich in Wirklichkeit aus mehreren voneinander unabhängigen Einzelleistungen unseres Gehirns zusammen. Entsprechend unterschiedlich können auch mögliche Einbußen ausfallen, denn jede dieser Komponenten kann für sich gestört sein, während andere intakt bleiben. Bis heute ist diese Erkenntnis allerdings weder in die gängigen diagnostischen Handbücher psychischer Störungen, das DSM-IV und den ICD-10, noch in die medizinischen Praxis eingegangen.

Eine zentrale Einzelleistung ist die Steuerung des Aufmerksamkeitsfelds – jenes Ausschnitts unserer Umgebung, auf den wir bewusst achten. Die Empfindlichkeit unseres Sehsystems passt sich den Umständen an. Erwarten wir beispielsweise, dass ein Auto von rechts im Gesichtsfeld auftauchen könnte, während wir die Augen geradeaus auf den Verkehr vor uns gerichtet halten, erhöhen wir willentlich die Sensibilität des Gehirns für Informationen im rechten Sehfeld. Subjektiv erleben wir das als Richten der Aufmerksamkeit dorthin. Man kann in Labormessungen nachweisen, dass dann in dem entsprechenden Netzhautareal lichtschwache Reize Reaktionen auslösen, die normalerweise nicht mehr registriert würden. Es lassen sich sogar gezielt sehr kleine Bereiche unseres Gesichtsfelds auf diese Weise sensibilisieren.

Je schwerer die Aufgabe, desto mehr Hirnaktivität

Welche neurobiologischen Mechanismen dem zu Grunde liegen, entdeckte ein Forscherteam um Yao Chen und Susana Martinez-Conde vom Laboratory of Visual Neuroscience des Barrow Neurological Institute in Phoenix, US-Bundesstaat Arizona. Die Wissenschaftler brachten Affen bei, geradeaus zu blicken, während ein Lichtreiz irgendwo im Gesichtsfeld erscheint. Zudem trainierten sie die Tiere darauf, bei einer veränderten Farbe des Reizes einen Hebel zu betätigen. Vor einem solchen Stimulus erhielten die Affen einen Hinweis, in welchem Bereich des Gesichtsfelds er erscheinen wird und ob sich die Farbänderung einfach oder nur schwer entdecken lässt. Je nachdem richteten sie folglich mehr oder weniger Aufmerksamkeit dorthin, wo sie den Lichtreiz erwarteten.

Es zeigte sich, dass bei einer als schwierig angekündigten Aufgabe 42 Prozent der Nervenzellen im betreffenden Bereich des Sehsystems des Großhirns (Area V1) überdurchschnittlich stark feuerten. Erwarteten die Tiere eine leichte

AUF EINEN BLICK

SCHEINWERFER DES BEWUSSTSEINS

1 Was wir im Alltag »Aufmerksamkeit« nennen, setzt sich aus **mehreren voneinander unabhängigen Teilleistungen** zusammen. Entsprechend unterschiedlich fallen auch einzelne Aufmerksamkeitsdefizite aus.

2 **Heranwachsende mit ADHS** leiden unter Umständen an sehr verschiedenen Teilleistungsstörungen. Kinderärzte und Therapeuten müssen sie daher jeweils individuell betrachten und behandeln.

3 Die Fokussierung der Aufmerksamkeit wird durch Hirnstrukturen gesteuert, die **Teile des präfrontalen Kortex und der Großhirnrinde im Bereich von Schläfen- und Scheitellappen** einschließen.

Aufgabe, waren nur acht Prozent der Neurone dort aktiver. Dieser Zusammenhang zwischen Aufmerksamkeit und Höhe der Entladungsrate trat jedoch nur in jenen Bereichen der Sehrinde auf, die den Ort im Gesichtsfeld repräsentieren, für den die Reize angekündigt waren.

Übertragen auf den Fall von Herrn S. lässt sich annehmen, dass dieser seine Aufmerksamkeit in Fahrtrichtung richtete, also in das Zentrum des Gesichtsfelds. In dessen Außenbereichen erwartete er keine bedeutsamen Reize wie sich nähernde Fahrzeuge, da er irrtümlich glaubte, er hätte Vorfahrt. Wegen seiner Müdigkeit war das Aufmerksamkeitsniveau dort besonders niedrig. Die Hirnareale, die diese äußeren Gesichtsfeldbereiche repräsentieren, waren also nur sehr wenig aktiv. Informationen am Gesichtsfeldrand wie das Stoppschild oder das sich nähernde Fahrzeug übersah er deshalb.

Fehlsteuerungen des Aufmerksamkeitsfelds treten auch bei verschiedenen Störungen auf, wie man sie häufig bei Kindern und Jugendlichen beobachtet: Das Feld weitet sich nicht nach den Erfordernissen der Situation aus, weshalb die Betroffenen Objekte übersehen, etwa im Schulunterricht. Sie wirken dann oft schwerfällig und reaktionsträge. Umgekehrt weisen viele Kinder mit einem Aufmerksamkeitsdefizitsyndrom mit oder ohne Hyperaktivität (AD(H)S) eine dauernde

Selbst ein auffälliges Stoppschild übersieht ein Autofahrer leicht, wenn seine Aufmerksamkeit nicht darauf gerichtet ist. Im konkreten Einzelfall führt vielleicht Müdigkeit zu einem eingeengten Aufmerksamkeitsfeld oder zu unsystematischen Suchbewegungen von Augen und Kopf.

DREAMSTIME / CHRIS DRISCOLL

Weitstellung des Aufmerksamkeitsfelds auf. Sie registrieren dadurch fortwährend völlig irrelevante Objekte der Umwelt, lassen sich also beispielsweise in der Schule leicht ablenken, anstatt sich mit dem zu beschäftigen, was ihren Lehrern wichtig ist. »Ihr Kind ist unfähig, sich mehr als fünf Minuten auf etwas zu konzentrieren«, bekommen die Eltern dann oft vorgehalten.

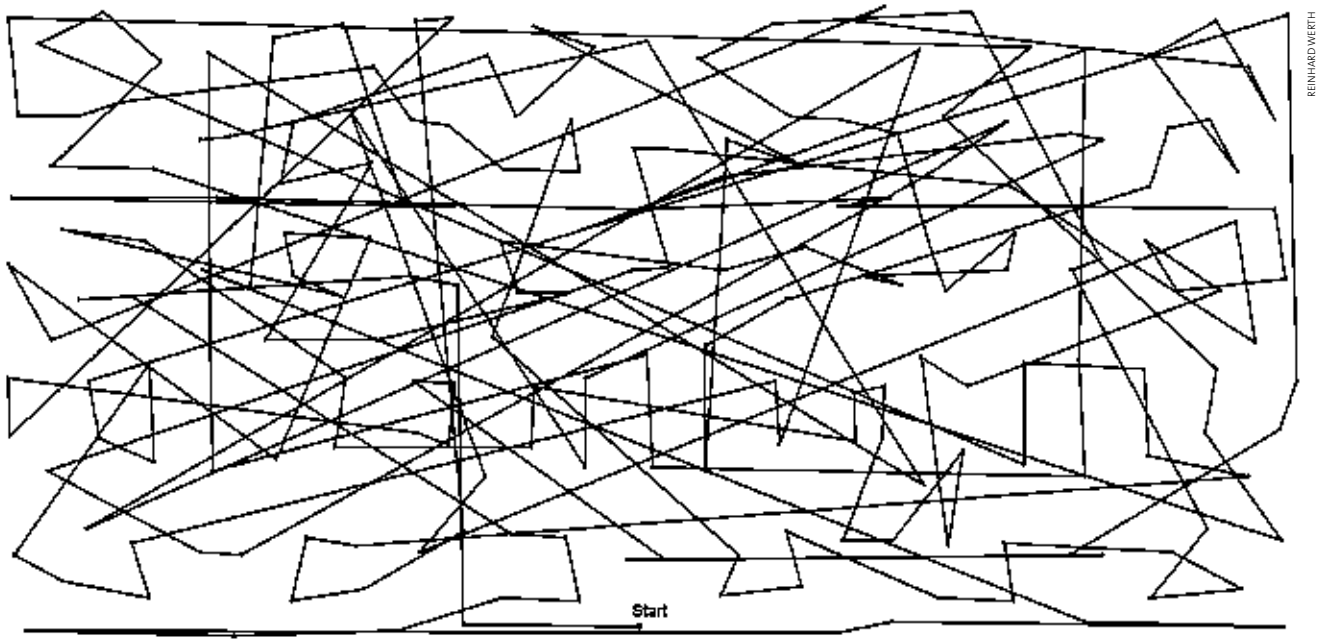
Ein typischer Fall von erweitertem Aufmerksamkeitsfeld tritt etwa bei meiner Patientin Frau H. zu Tage. In einer Umgebung mit zahlreichen ablenkenden Reizen, zum Beispiel einem Restaurant, fällt es ihr schwer, sich auf den Gesprächspartner zu konzentrieren. Fortwährend entdeckt sie Personen im Gesichtsfeld, die andere Menschen übersehen würden, und ihre Augen springen unwillkürlich bald zu dieser, bald zu jener. Zudem kann Frau H. es nicht vermeiden, Gesprächen an Nachbartischen zuzuhören, die sonst niemand wahrnähme. Dennoch ist sie in entscheidenden Situationen mit einiger Anstrengung in der Lage, ihre Aufmerksamkeit zu fokussieren, so dass sie in Studium und Beruf erfolgreich ist. Das ständig erweiterte Aufmerksamkeitsfeld hat hier sogar den Vorteil, dass Frau H. über eine besondere Beobachtungsgabe verfügt und manches aufschnappt, was anderen entgeht. Damit handelt es sich bei ihrem Fall zwar um eine Abweichung von der Norm, aber keine echte Erkrankung.

Ganz anders verhielt es sich bei einem siebenjährigen Jungen, den ich vor einigen Jahren untersuchte. Er konnte seinen Blick zwar einige Sekunden auf einen Reiz richten, solange sich keine weiteren in seinem Gesichtsfeld befanden. Doch jeder noch so schwache neue Stimulus, den ein normaler Beobachter nicht wahrnehmen würde, wurde registriert und zog seinen Blick geradezu magnetisch an. Der Junge erwies sich als derart leicht ablenkbar, dass er nicht am Schulunterricht teilnehmen konnte. Eine genaue Untersuchung seines Aufmerksamkeitsfelds brachte an den Tag, dass er unerwartet auftretende Lichtpunkte von einer äußerst geringen Helligkeit entdeckte, die andere Kinder gar nicht mehr registrierten, und die Augen auf sie richtete.

Schere als Puzzlebild

Umgekehrt können sich nach einer Hirnschädigung geradezu röhrenartige Einschränkungen des Aufmerksamkeitsfelds einstellen. Der deutsche Militärarzt Walther Poppelreuter (1886–1939) beschrieb das bereits 1917 sehr treffend als »Störung des Überschauens«. Ein Patient von mir, bei dem geschädigte Hirnregionen durch eine verminderte Durchblutung nachweisbar waren, konnte sein Aufmerksamkeitsfeld nicht einmal so weit ausdehnen, dass er einen Gegenstand wie eine Schere als Ganzes wahrnahm. Obwohl er in keinem Gesichtsfeldbereich erblindet war, vermochte er jeweils nur einen Teil einer Klinge zu erkennen, dann eine zweite Klinge, schließlich deren Kreuzung und zuletzt die Griffe. Daraus schloss er, dass es sich um eine Schere handeln müsse. Untersuchte man dagegen sein Gesichtsfeld mit einem einzigen Lichtpunkt, zeigte sich keinerlei Einschränkung – egal, wo darin der Reiz auftauchte.

Gilt es, ein Objekt genau visuell zu analysieren, so müssen wir den Blick darauf richten und an der Stelle des schärfsten Sehens im Zentrum des Gesichtsfelds (Fovea centralis) ein Aufmerksamkeitsfeld ausbilden. Objekte außerhalb dieses Felds erkennen wir dann schlechter. Es kann jedoch auch



REINHARD WERTH

Die Linien zeichnen die unsystematischen Suchbewegungen bei einem siebenjährigen Jungen nach, der am Computer ein Bild nach zwei Zentimeter langen Strichen durchforsten und jeden davon mit der Maus markieren sollte. Den Grad der Systematik bei diesem Test drücken Psychologen mit dem so genannten Explorationsleistungsfaktor aus.

sein, dass wir auf etwas schauen und dennoch kein Aufmerksamkeitsfeld ausbilden. Das sind etwa Zustände, die man im Alltag als »geistig abwesend«, »träumen mit offenen Augen« und »mit leerem Blick vor sich hin starren« bezeichnet. So mag ein Schüler seinen Blick durchaus auf die Tafel richten und dennoch das dort Notierte nicht erfassen, weil er für die Stelle schärfsten Sehens kein Aufmerksamkeitsfeld ausbildet. Die Information über die abgebildeten Reize gelangt dann zwar ins Gehirn, wird dort aber nur wenig oder gar nicht verarbeitet.

Eine ganz andere Art von Problem sind Störungen der visuellen Exploration: des Absuchens der Umwelt mittels Augen- und Kopfbewegungen. Dieses ist notwendig, da die Sehschärfe zum Rand des Gesichtsfelds hin rapide abnimmt. Wandert ein Reiz, etwa ein Verkehrsschild oder ein Fahrzeug, in die Peripherie des Gesichtsfelds, kann es dort auf Grund der geringen Sehschärfe nicht ausreichend analysiert werden. Das Bild dieses Objekts muss hierfür erst mittels Augen- und Kopfbewegungen in das Zentrum des Gesichtsfelds gelangen: zum Ort des schärfsten Sehens. In Situationen wie dem Straßenverkehr, in denen laufend neue wichtige Reize in das Gesichtsfeld treten, lösen diese automatisch solche motorischen Reaktionen aus.

In Situationen wie dem Straßenverkehr lösen neue wichtige Reize laufend **automatische Augen- und Kopfbewegungen** aus

Daneben erfolgen solche Bewegungen auch laufend spontan und ohne dass sie willentlich gesteuert werden. So erkunden wir fortwährend unsere Umwelt, ohne jedes Mal bewusst zu entscheiden, wohin wir als Nächstes schauen werden.

Das Absuchen der Umwelt durch Augen- und Kopfbewegungen muss nun einem bestimmten Plan folgen, damit ein Mensch die Ausschnitte seiner Umwelt und die Objekte, die in der jeweiligen Situation für ihn wichtig sind, möglichst rasch entdeckt und analysiert. Nähert sich ein Autofahrer zum Beispiel einer Kreuzung, so wird er in der Regel nicht in die Wolken oder auf das Grün der Alleebäume schauen, sondern nach einem Verkehrsschild suchen, das die Vorfahrt regelt, und dann in die Seitenstraße blicken. Nur so kann rechtzeitig eine der Situation angemessene Reaktion erfolgen. Bei planlosem Absuchen dauert es nicht nur länger, bis die Bilder wichtiger Objekte zum Ort schärfsten Sehens verschoben werden, sondern sie werden auch leichter völlig übersehen.

Eine Störung der visuellen Exploration beobachten Mediziner bei manchen Patienten mit erworbenen Hirnschädigungen, aber auch bei Kindern mit entwicklungsbedingten Aufmerksamkeitsstörungen. Wenn die Betroffenen sich orientieren oder ein Objekt suchen, schauen sie ziellos umher (siehe Bild links). Diese Form der Aufmerksamkeitsstörung unterscheidet sich grundlegend etwa von der Ablenkbarkeit auf Grund eines ständig zu weit ausgedehnten Aufmerksamkeitsfelds. Tobias Barner und ich haben am Institut für Soziale Pädiatrie und Jugendmedizin der Ludwig-Maximilians-Universität München ein Verfahren entwickelt, mit dem wir verschiedene Abstufungen mangelnder Suchsystematik ausdrücken und vergleichen können.

Allein die Tatsache, dass das Bild eines Objekts auf der Netzhaut am Ort schärfsten Sehens ist und hierfür ein Aufmerksamkeitsfeld ausgebildet wurde, reicht noch nicht aus, damit ein Proband das Objekt richtig erkennt. Entscheidend ist auch die Fixationszeit: die Zeitspanne, die das Abbild in der Fovea centralis verweilt. Bereits die Alltagserfahrung lehrt, dass wir viele Dinge oder Vorgänge nicht richtig erfassen, wenn wir nur einen flüchtigen Blick auf sie werfen. So müssen etwa mehrere übereinander angebrachte Verkehrsschilder oder ein Fußgänger am Fahrbahnrand lange genug im Bereich schärfsten Sehens verbleiben, also fixiert werden, damit wir sie erkennen. Sonst können wir die Bedeutung der Verkehrsschilder oder die Absicht des Fußgängers nicht entschlüsseln.

Kinder zeigen häufig zu kurze Fixationszeiten: Sie blicken dann nur flüchtig zu Objekten hin und wenden den Blick bereits wieder von ihnen ab, bevor sie sie richtig erkannt haben. Dem zu Grunde liegen Fehler des Gehirns bei der Aufgabe, automatisch, also unbewusst, zu entscheiden, wie lange der Blick auf ein Objekt oder eine Szene gerichtet sein muss. Manchmal ziehen auch Reize, die in der Peripherie des Gesichtsfelds erscheinen und normalerweise ignoriert werden, die Augen automatisch auf sich. Diesem Impuls können die Kinder nur mit Mühe oder gar nicht widerstehen.

Wann ein kurzer Blick nicht genügt

Auf zu kurzen Fixationszeiten beruhen häufig auch Lesestörungen. Ein Kind, das nur einen kurzen Blick auf die Tafel wirft, wird ein dort aufgezeichnetes Schaubild nicht erfassen, eine dort ausgeführte Rechenaufgabe nicht verstehen, einen geschriebenen Text nicht lesen können. Wie lange die Fixation dauern muss, hängt von der Komplexität des Gegenstands oder der Szene ab.

Um all diese verschiedenen Komponenten der visuellen Aufmerksamkeit unter genauer Kontrolle der Augenbewegungen zu untersuchen, haben Tobias Barner und ich gemeinsam mit weiteren Kollegen computergestützte Diagnoseverfahren entwickelt. Außer der erwähnten visuellen Exploration untersuchen wir dabei unter anderem die Fähigkeit, einen stationären und einen bewegten Reiz in Gegenwart ablenkender Stimuli konstant zu fixieren, messen die Größe des Aufmerksamkeitsfelds in Abhängigkeit von Anzahl, Helligkeit und Kontrast der Reize und erfassen Reaktionszeiten je nach Ort, auf den die Aufmerksamkeit einer Testperson fokussiert wird. Außerdem registrieren wir Maskierungseffekte – also das gegenseitige Verdecken benach-

barter Reize – sowie die Fähigkeit zur geteilten Aufmerksamkeit, mit der sich etwa gleichzeitig visuelle und auditive Informationen entdecken lassen. Eine neu entwickelte Software ermöglicht in diesen Tests die hierfür notwendige Kontrolle von Fixation und Augenbewegungen.

Allein im Bereich des Sehens finden sich also ganz unterschiedliche Formen von Aufmerksamkeitseinbußen:

➤ Das Aufmerksamkeitsfeld ist zu schwach ausgeprägt oder zu klein. Damit einher geht eine geringe Aktivierung in dem Großhirnrindenareal, das Reize in diesen Bereich verarbeitet.

➤ Das Aufmerksamkeitsfeld ist dauerhaft zu weit gestellt, weshalb unwichtige Informationen nicht »herausgefiltert« werden. Manchmal lenken auch irrelevante Reize die Augen von relevanten ab, weil sich der von ersteren ausgehende Impuls nicht unterdrücken lässt.

➤ Suchbewegungen mit Augen und Kopf laufen zu unsystematisch ab, wodurch es zu lange dauert, bis der Betroffene die wichtigen Reize findet und ihr Abbild zum Ort schärfsten Sehens gelangt.

➤ Die Fixationszeit ist zu kurz, um das Objekt richtig zu erkennen.

Verkehrsunfälle wie der eingangs beschriebene beruhen meist spezifisch auf der Verminderung einer oder mehrerer dieser Teilleistungen – und nicht etwa auf einer allgemein reduzierten Aufmerksamkeit.

Viele Alltagstätigkeiten, auch das Autofahren, erfordern zudem, die Aufmerksamkeit gleichzeitig auf mehrere Ereignisse zu richten. Wie schwierig das ist, zeigt sich bereits daran, dass es kaum möglich ist, zwei Sprechern gleichzeitig zu lauschen. Wollen Sie etwa Ihrem Gesprächspartner am Telefon zuhören und gleichzeitig den Nachrichten im Radio folgen, werden Sie feststellen, dass Ihnen das nicht gelingt. Sie verstehen nur jeweils den Sprecher, auf den Sie gerade achten.

Besonders gefordert ist die Aufmerksamkeit beim Erlernen eines Musikinstruments: Man muss gleichzeitig die Noten lesen, die Finger bewegen und dabei auch noch den Rhythmus und den musikalischen Ausdruck berücksichtigen.

Aufmerksamkeit ist ein **begrenztes Gut**. Beansprucht eine Tätigkeit viel davon, kann man einer anderen nur entsprechend weniger widmen

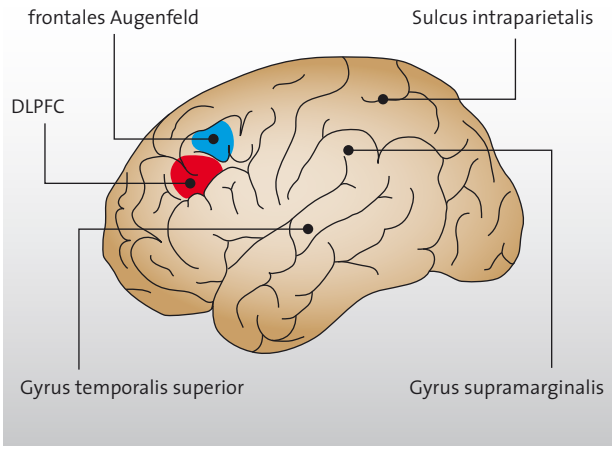
All das ist deshalb so schwierig, weil es sich bei Aufmerksamkeit um ein begrenztes Gut handelt. Beansprucht eine Tätigkeit viel davon, kann man einer anderen entsprechend weniger widmen. Das Gehirn meistert diese Aufgabe, indem es bestimmte Abläufe beim Lernen automatisiert.

So muss ein Fahranfänger seine Aufmerksamkeit noch gleichzeitig auf das Verkehrsgeschehen und die komplizierten motorischen Tätigkeiten beim Steuern richten. Im Lauf der Zeit werden Letztere automatisiert, so dass mehr Aufmerksamkeit zum Beobachten des Verkehrsgeschehens zur Verfügung steht.

Dieser Aspekt spielt auch bei den bereits erwähnten Lesestörungen, die oft pauschal als »Legasthenie« bezeichnet werden, eine Rolle. Verschiedene Hirnleistungen, die das Lesen erst ermöglichen und normalerweise automatisiert sind, erfordern so viel Aufmerksamkeit, dass für den Inhalt des Ge-

Anatomie der Aufmerksamkeit

Welche Hirnstrukturen einzelne Aufmerksamkeitsleistungen vermitteln und welche neuronalen Störungen welche Beeinträchtigungen hervorbringen, ist bis heute nicht befriedigend geklärt. Das Richten der Aufmerksamkeit auf einen bestimmten Raumausschnitt dürfte unter anderem vom so genannten dorsolateralen präfrontalen Kortex (Abkürzung DLPFC) hinter der Stirn abhängen sowie von der Großhirnrinde im Bereich des Sulcus intraparietalis. Das frontale Augenfeld, ebenfalls ein Teil des präfrontalen Kortex, scheint die Aufmerksamkeitssteuerung im visuellen System über den Sulcus intraparietalis zu kontrollieren. Entdeckt eine Versuchsperson einen gesuchten visuellen Reiz und zieht dieser die Aufmerksamkeit auf sich, so scheint die Aufmerksamkeitsfokussierung über Hirnregionen im Bereich des Gyrus supramarginalis und des Gyrus temporalis superior gesteuert zu werden. Bei der Suche selbst sind diese Areale dagegen nicht aktiv. Auch bei ADHS funktionieren wohl Teile des präfrontalen Kortex, die Dopamin und Noradrenalin als Überträgersubstanzen verwenden, nicht richtig.



Für die Aufmerksamkeitssteuerung relevante Bereiche des menschlichen Gehirns. DLPFC: dorsolateraler präfrontaler Kortex

lesenen zu wenig übrig bleibt. Dies wirkt sich besonders bei so genannten eingekleideten (sprachlich formulierten) Mathematikaufgaben aus, so dass oft die falsche Diagnose »Rechenstörung« gestellt wird.

Vor allem nach Schädigungen in der rechten Hirnhemisphäre zeigt sich manchmal ein kurioses Phänomen: Die Betroffenen richten von sich aus ihre Aufmerksamkeit überhaupt nicht mehr auf einen bestimmten Bereich des Raums oder auch ihres eigenen Körpers, etwa auf einen Arm. Dies darf man nicht mit einem so genannten Neglect verwechseln, bei dem das Bewusstsein für die Existenz der betreffenden Raum- beziehungsweise Körperhälfte fehlt.

Der vergessene linke Arm

So »vergaß« eine Patientin von mir, die an einem Tumor der rechten Hirnhemisphäre litt, geradezu die Existenz ihres linken Arms! Schrieb sie mit rechts auf ein Blatt Papier und rutschte dieses weg, kam sie nicht auf die Idee, es mit der linken Hand festzuhalten. Doch das Bewusstsein für die Existenz des linken Armes war dabei nicht verloren. Sobald ich ihre Aufmerksamkeit auf diesen lenkte, verwendete sie ihn. Ein Zwölfjähriger ohne erkennbare Hirnschädigung wiederum lenkte sein Fahrrad nur mit dem rechten Arm und ließ den linken, voll funktionsfähigen herunterhängen. Beide Patienten mussten üben, ihre Aufmerksamkeit in einem bestimmten zeitlichen Rhythmus bewusst auf den linken Arm zu richten, bis sie gelernt hatten, ihn wieder automatisch einzusetzen.

Die aktuelle Forschung zeigt: Ärzte und Therapeuten sollten nicht pauschal von einer »Aufmerksamkeitsstörung« sprechen, und entsprechend gibt es auch keine allgemein gültige »Aufmerksamkeitstherapie«. Stattdessen gilt es, Patienten auf die verschiedenen Einzelleistungen hin zu untersuchen und die Behandlung an der jeweiligen speziellen Störung auszurichten. ~

DER AUTOR

Reinhard Werth ist Neuropsychologe und Professor für Medizinische Psychologie an der Ludwig-Maximilians-Universität München.

QUELLEN

Chen, Y. et al.: Task Difficulty Modulates the Activity of Specific Neuronal Populations in Primary Visual Cortex. In: Nature Neuroscience 11, S. 974–982, 2008

Steinhausen, H.C. et al. (Hg.): Handbuch ADHS. Grundlagen, Klinik, Therapie und Verlauf der Aufmerksamkeitsdefizit-Hyperaktivitätsstörung. W. Kohlhammer, Stuttgart 2010

Werth, R.: Die Wurzeln der Legasthenie. In: Gehirn&Geist 7-8/2008, S. 64–70

LITERATURTIPP

Werth, R.: Die Natur des Bewusstseins – wie Wahrnehmung und freier Wille im Gehirn entstehen. C.H.Beck, München 2010
Anhand klinischer Fälle aus seiner Praxis versucht der Autor, das Konzept »Bewusstsein« wissenschaftlich präzise zu beschreiben.

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1135749**

Beutelteufel sind beeindruckende Tiere. Doch gegen den ansteckenden Krebs, der sie massenhaft dahinrafft, haben sie möglicherweise keine Chance.

GETTY IMAGES / STEVE MORENOS

ONKOLOGIE

Teuflische Krankheit

Eine ansteckende Krebserkrankung droht den Tasmanischen Teufel auszurotten. Zoologen versuchen, der rätselhaften Seuche Herr zu werden. Können ähnliche Tumoren auch beim Menschen entstehen?

Von Menna E. Jones und Hamish McCallum

Der Freycinet-Nationalpark an der Ostküste der australischen Insel Tasmanien ist ein Juwel der Natur. Hier blühen Akaziensträucher, rauscht das Meer in azurblauen Buchten, laden rosa Granithügel zum Wandern ein und lockt der Sandstrand der Wineglass Bay. Ich (Jones) sitze auf der Erde und halte ein junges Beutelteufel-Weibchen fest, das ich eingefangen habe. Das Tier trägt Liebesbisse am Hals, hat sich also kürzlich gepaart. Doch die kleinen Verletzungen künden nicht nur von der Zeugung neuen Lebens, sie sind auch ein böses Vorzeichen: Vielleicht ist das Weibchen schon tot, bevor es ihren ersten Wurf Jungtiere großziehen kann.

Hier, im Freycinet-Nationalpark, lernte ich 2001 erstmals die heimtückische Krankheit kennen: Im Gesicht der Tasmanischen Teufel entstehen große, eiternde Tumoren, welche die Tiere am Fressen hindern und meist innerhalb von sechs Monaten nach der Ansteckung zum Tod führen. Heute ist der Bestand an Beutelteufeln im Freycinet-Park nahezu verschwunden – ein Abbild dessen, was sich fast überall im Verbreitungsgebiet der Spezies abspielt. Die Krebserkrankung, von der man heute weiß, dass sie ansteckend ist, wurde 1996 im Nordosten Tasmaniens entdeckt und hat seither die Bestände auf der ganzen Insel um bis zu 95 Prozent dezimiert. Damit steht die Spezies, die nur hier heimisch ist, kurz vor dem Aussterben.

Die meisten Krebserkrankungen sind glücklicherweise nicht übertragbar: Wir können im Bus neben einem Krebspatienten sitzen und müssen nicht befürchten, selbst einen Tumor zu bekommen. Zwar gibt es ansteckende Viren oder Bakterien, die bösartige Veränderungen in menschlichen Zellen hervorrufen, etwa die humanen Papillomviren, die Gebärmutterhalskrebs verursachen. Doch sie verbreiten die Krankheit nicht unmittelbar von Mensch zu Mensch, sondern lassen die Zellen der infizierten Person nur mit größerer Wahrscheinlichkeit entarten. Beim Beutelteufel dagegen sind die Tumorzellen selbst die übertragbaren Erreger.

Das rasche Aussterben des Tasmanischen Teufels wirft viele Fragen auf und gibt Anlass zu intensiven Forschungen. Wie wurde der Krebs ansteckend, und was kann man tun, um seine Verbreitung aufzuhalten? Und könnten ähnliche Tumoren sich auch unter Menschen verbreiten? Offenbar lautet die Antwort: Vorerst haben wir gute Chancen, dass uns das Schicksal der Beutelteufel erspart bleibt, aber eines Tages könnte sich das ändern (siehe Kasten auf S. 44).

Neben der Krankheit des Tasmanischen Teufels kennt man in freier Wildbahn nur noch eine weitere ansteckende Krebsform: das Sticker-Sarkom, einen Tumor der äußeren Geschlechtsorgane von Hunden. Diese Krankheit, die es vermutlich seit einigen tausend Jahren gibt, überträgt sich während des Geschlechtsverkehrs von Tier zu Tier. Beim Menschen werden Tumoren gelegentlich von der Mutter an den Fetus weitergegeben oder zusammen mit Organen transplantiert; in der Regel jedoch beginnt und endet eine Krebserkrankung in einem einzigen Organismus. Krebszellen können im Körper zwar erhebliche Schäden anrichten, sie stoßen aber auch auf zahlreiche Barrieren, die normalerweise verhindern, dass sie von einem Individuum auf ein anderes übergehen. Bei den Tasmanischen Teufeln verbreitet sich der ansteckende Tumor auf Grund eines unglücklichen Zusammentreffens mehrerer Faktoren.

Typischerweise entsteht eine Krebserkrankung, indem sich einige Zellen genetisch verändern, woraufhin sie der Kontrolle des Organismus entgleiten und ein Eigenleben entwickeln. Wenn sie sich ungebremst vermehren und dabei das

AUF EINEN BLICK

DER FLUCH DER BEUTELTEUFEL

1 Ein ansteckender **Gesichtskrebs** hat die Tasmanischen Teufel in weniger als 20 Jahren an den Rand des Aussterbens getrieben.

2 Ansteckend ist der Krebs unter anderem deshalb, weil die Beutelteufel sich häufig gegenseitig beißen. Dabei gelangen Zellen des Tumors in die Wunden des gebissenen Tiers und siedeln sich dort an. Zudem sind sich die meisten Beutelteufel **genetisch sehr ähnlich**, so dass ihr **Immunsystem** die eingedrungenen Krebszellen nicht als fremd erkennt und deshalb auch nur unzureichend gegen sie vorgeht.

3 Auch beim Menschen könnten unter bestimmten Voraussetzungen **ansteckende Krebsarten** entstehen; allerdings scheint keine unmittelbare Gefahr zu drohen.

umgebende Gewebe verdrängen, bilden sie einen Tumor. Mit jeder weiteren Teilung können zusätzliche genetische Änderungen auftreten, so dass ein wachsender Tumor sich allmählich zu einer komplexen Gemeinschaft aus unterschiedlich stark entarteten Zellen entwickelt. Irgendwann kann die Zellmasse derart zunehmen, dass ihre Sauerstoff- und Nährstoffversorgung nicht mehr ausreicht. Dann setzt sie verschiedene Substanzen frei, die neue Blutgefäße zum Tumor sprossen lassen. Unter Umständen geht das damit einher, dass Tumorzellen sich von der Masse ablösen und im Organismus verteilen. Die Zellen wandern mit dem Blut oder der Lymphe, setzen sich in anderen Organen fest und bilden dort neue Tumoren (Metastasen). Doch wenn der Wirtsorganismus stirbt, gehen sowohl der Ausgangstumor als auch seine Tochtergeschwülste zu Grunde. Deshalb wäre es für bösartige Zellen von großem Vorteil, wenn sie sich auf andere Organismen ausbreiten könnten.

Dieser Weg ist jedoch voller Hürden. Zunächst einmal können Zellen nur dann von einem Organismus in einen anderen gelangen, wenn das sehr rasch geschieht. Zellen sind an das Überleben in der Außenwelt nicht angepasst. In der Regel trocknen sie schnell aus und sterben innerhalb weniger Minuten, nachdem sie den Körper verlassen haben. Damit Krebszellen übertragen werden können, muss ihr Wirt in direkten Kontakt mit lebendem Gewebe eines anderen Organismus kommen.

Dort angelangt, müssen die Tumorzellen der Immunabwehr des neuen Wirts entgehen. Diese verfügt bei höheren Tieren über zahlreiche Mechanismen, um fremde Zellen aufzuspüren und zu zerstören. Natürliche Killerzellen und zytotoxische T-Lymphozyten etwa erkennen Zellen, die anders aussehen als die des eigenen Organismus, und vernichten sie. Ermöglicht wird das dadurch, dass Zellen auf ihrer Oberfläche bestimmte Proteinstrukturen präsentieren, die für

Ansteckende Krebserkrankungen – eine Gefahr für Menschen?

Menschen weisen eine größere genetische Vielfalt auf als Tasmanische Teufel; zudem praktizieren sie im Allgemeinen kein Verhalten, das eine direkte Übertragung von Tumorzellen so erleichtert, wie es bei den Tieren der Fall ist. Angesichts dessen ist es unwahrscheinlich, dass unsere Spezies ein ähnliches Schicksal wie die Beutelteufel erleidet. Selbst wenn ein Mensch von einem infizierten Beutelteufel oder einem Hund mit Sticker-Sarkom gebissen würde, wäre durch die genetischen, molekularen und zellulären Unterschiede zwischen den Spezies gewährleistet, dass eine starke Immunabwehr die eingedrungenen Zellen erkennt und abtötet. Der gebissene Mensch würde weder erkranken noch die Krankheit an andere weitergeben.

Dennoch gibt es Anlass zur Sorge. Theoretisch könnten ansteckende Krebserkrankungen in einer Gruppe von Menschenaffen (etwa Schimpansen, Gorillas oder Orang-Utans) entstehen, die wegen des Rückgangs ihrer Bestände nur wenig genetische Variabilität aufweisen. Würden diese Tiere von Menschen mit einem geschwächten Immunsystem gejagt, könnten die Tumorzellen durch engen Körperkontakt auf humane Wirte übergehen und sich dann in der Bevölkerung verbreiten. Diese Voraussetzungen sind gegeben, wenn Menschengruppen mit hoher HIV-Infektionsrate gefährdete Affenarten jagen, etwa in Afrika.

Allerdings dürfte die Übertragung über Artgrenzen hinweg nicht der wahrscheinlichste Weg sein, auf dem eine ansteckende Krebsform des Menschen entstehen könnte. Denn bislang kennen wir keinen einzigen Fall aus der Natur, bei dem sich artfremde Tiere mit dem übertragbaren Hundetumor angesteckt hätten – obwohl es im Labor gelungen ist, die Krankheit auf näher und weitläufiger verwandte Hundeartige zu übertragen. Beunruhigender ist das starke Anwachsen der menschlichen Bevölkerung. Millionen Menschen sind heute mit HIV infiziert: Ihr Immunsystem ist geschwächt, wodurch sie häufig an Krebsarten erkranken, die früher selten waren. Diese Situation begünstigt die Evolution ansteckender Tumoren. Die Möglichkeit, dass eine Krebserkrankung zunächst bei immungeschwächten Menschen auftritt und später auch die gesunde Bevölkerung infiziert, ist nicht von der Hand zu weisen. Bei Hunden ist genau das geschehen: Das Sticker-Sarkom, das ursprünglich wohl in einer genetisch sehr einheitlichen Population mit starker Inzucht entstand, kann heute auch Hunde- und Wolfsbestände anstecken, die sich durch große genetische Variabilität auszeichnen. Dass die Krankheit meist nicht tödlich verläuft, ist dabei keine große Beruhigung. Denn wahrscheinlich machte sie zunächst eine Phase durch, in der sie viele ihrer Wirtsorganismen tötete, so wie wir es heute von HIV kennen. Erst später vermehrten sich Hunde- und Wolfspopulationen, die den Krebs unter Kontrolle halten konnten, und irgendwann stellten sie die Mehrzahl.

Die Krebserkrankung der Beutelteufel bietet für Biologen eine einzigartige Gelegenheit, mehr über ansteckende Krebsarten zu erfahren. Außerdem gemahnt sie uns Menschen daran, was wir potenziell anrichten können, ohne es beabsichtigt zu haben. Wir setzen Krebs erzeugende Wirkstoffe in üppigen Mengen in die Umwelt frei, gleichzeitig zerstören wir auf der ganzen Welt die natürlichen Lebensräume, was sowohl einen Verlust von Arten als auch von genetischer Vielfalt nach sich zieht. Infolge der Globalisierung und des Eindringens in bislang unberührte Lebensräume kommen Menschen und Wildtiere mit Krankheitserregern in Kontakt, denen sie nie zuvor begegnet sind. Wir können deshalb damit rechnen, dass künftig immer häufiger neue Krebsarten auftauchen werden, darunter solche, die ansteckend sind. Dass sie eines Tages auch uns infizieren könnten, möglicherweise indem sie Artgrenzen überspringen, lässt sich nicht ausschließen.

ihren Herkunftsorganismus charakteristisch sind. Es ist, als würden die Eindringlinge eine Fahne mit der Aufschrift »Ich bin ein Fremder« tragen, und wenn die Immunabwehr eine solche Fahne entdeckt, schlägt sie zu. Kodiert werden die Fahnen unter anderem von den sehr variablen Genen des so genannten Haupt-Histokompatibilitätskomplexes (*Major Histocompatibility Complex*, abgekürzt MHC). Nach Ansicht mancher Biologen sind diese Erbgutabschnitte im Lauf der Evolution vor allem deshalb so vielgestaltig geworden, um eine Übertragung von Krebszellen zu erschweren.

Leichtes Spiel für den Tumor

Das Handikap der Tasmanischen Teufel: Ihnen fehlen solche Übertragungshindernisse. Der Krebs, der sie dahinrafft – offiziell heißt er Beutelteufel-Gesichtstumorerkrankung (*Devil Facial Tumour Disease*, abgekürzt DFTD) – entsteht meist im Mund oder in seiner Nähe. Die Tiere beißen sich sowohl bei der Paarung als auch bei Kämpfen häufig, vielfach ins Gesicht. So können bösartige Zellen schnell auf ein anderes Individuum übergehen, entweder durch den Biss selbst, wenn die Zellen zuvor von der benachbarten Geschwulst auf die Zähne gelangt sind, oder indem der Gesichtstumor die Wunde des Partners streift. Auch das Sticker-Sarkom der Hunde verbreitet sich durch unmittelbaren Körperkontakt, in diesem Fall allerdings beim Reiben der Geschlechtsorgane während der Kopulation oder durch Lecken an den betroffenen Stellen. Sowohl bei Hunden als auch beim Beutelteufel wird der Tumor mit zunehmendem Alter und wachsender Größe immer brüchiger, so dass seine Zellen sich leichter ablösen, was ihre Übertragung begünstigt.

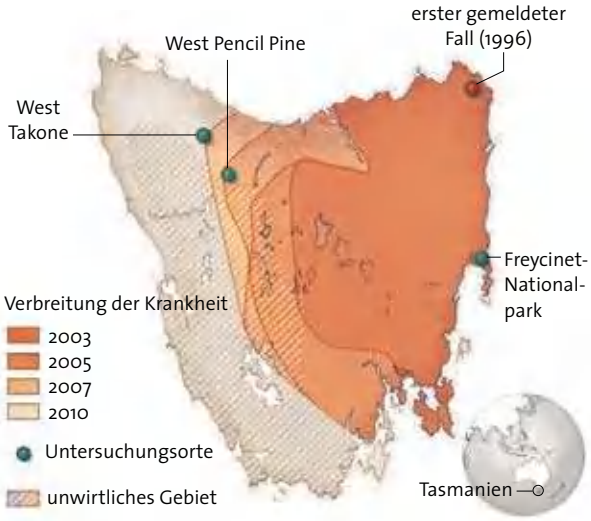
Hinzu kommt, dass die genetischen Unterschiede zwischen den Beutelteufeln gering sind, insbesondere bei den MHC-Genen. Wahrscheinlich ist die Population früher schon einmal stark dezimiert worden, wobei nur eine kleine Gruppe mit sehr ähnlicher genetischer Ausstattung überlebte. Daher ist ihr Immunsystem nur eingeschränkt in der Lage, die Zellen eines anderen Individuums als fremd zu erkennen – mit der Folge, dass es sie nur schwach oder überhaupt nicht bekämpft. Auch der Hundetumor hat sich nach derzeitigem Wissensstand in einer kleinen Population mit geringer genetischer Variabilität und hoher Inzucht herausgebildet, möglicherweise in einer isolierten Gruppe von Wölfen oder in einem kleinen Tierbestand zur Zeit der Domestikation.

Die Bedingungen, die bei Beutelteufeln und Hunden zur Übertragung von Krebszellen führen, sind wohl auch beim Menschen dafür verantwortlich, dass Tumoren manchmal von einer Mutter auf den Fetus oder von einem Organspender auf den Empfänger übergehen. In beiden Fällen wandern die Tumorzellen schnell von einem Wirt zum anderen, und das Immunsystem eines Fetus ist noch nicht ausgereift, während Transplantatempfänger Medikamente nehmen müssen, die das Immunsystem unterdrücken, um die Abstoßung des verpflanzten Organs zu verhindern.

Erbgutanalysen zufolge stammen die Tumoren der Tasmanischen Teufel von Krebszellen ab, die ursprünglich in einem einzigen Tier entstanden sind. Allen Tumoren gemein ist nämlich der Verlust bestimmter Chromosomen und Chromosomenabschnitte, die in den gesunden Körperzellen der betroffenen Individuen vorhanden sind. Da das Tier, von dem der Tumor stammt, längst nicht mehr lebt, werden wir nie genau erfahren, was die ursprünglichen Mutationen verursacht hat und wie der Krebs übertragbar wurde. Er könnte durch genetische Veränderungen entstanden sein, die sich im Gesicht nach wiederholten Verletzungen und Entzündungen vollzogen, ein Phänomen, das als entzündungsassoziierte Karzinogenese bezeichnet wird. Elizabeth Murchinson vom englischen King's College (Cambridge) berichtete 2010 in der Fachzeitschrift »Science«, der Tumor der Beutelteufel stamme von den Schwann-Zellen ab, die im peripheren Nervensystem die Fortsätze von Neuronen umhüllen.

Eine sich schnell ausbreitende Seuche

Seit der Gesichtstumor der Beutelteufel (Foto) 1996 im Nordosten Tasmaniens erstmals entdeckt wurde, hat er sich rasch ausgebreitet (Landkarte) und manche Bestände, etwa die im Freycinet-Nationalpark, um bis zu 95 Prozent dezimiert. Zuvor ging es den Tieren fast überall auf der Insel gut; eine Ausnahme machte nur der Südwesten mit seinem recht unwirtlichen Gelände (in der Karte schraffiert). Die Beutelteufel ganz im Nordwesten der Insel unterscheiden sich genetisch von ihren Artgenossen und sind deshalb für die Krankheit weniger anfällig. Die Autoren und ihre Mitarbeiter forschen in dieser Region, um herauszufinden, wie sich die Zahl der Beutelteufel wieder steigern lässt.

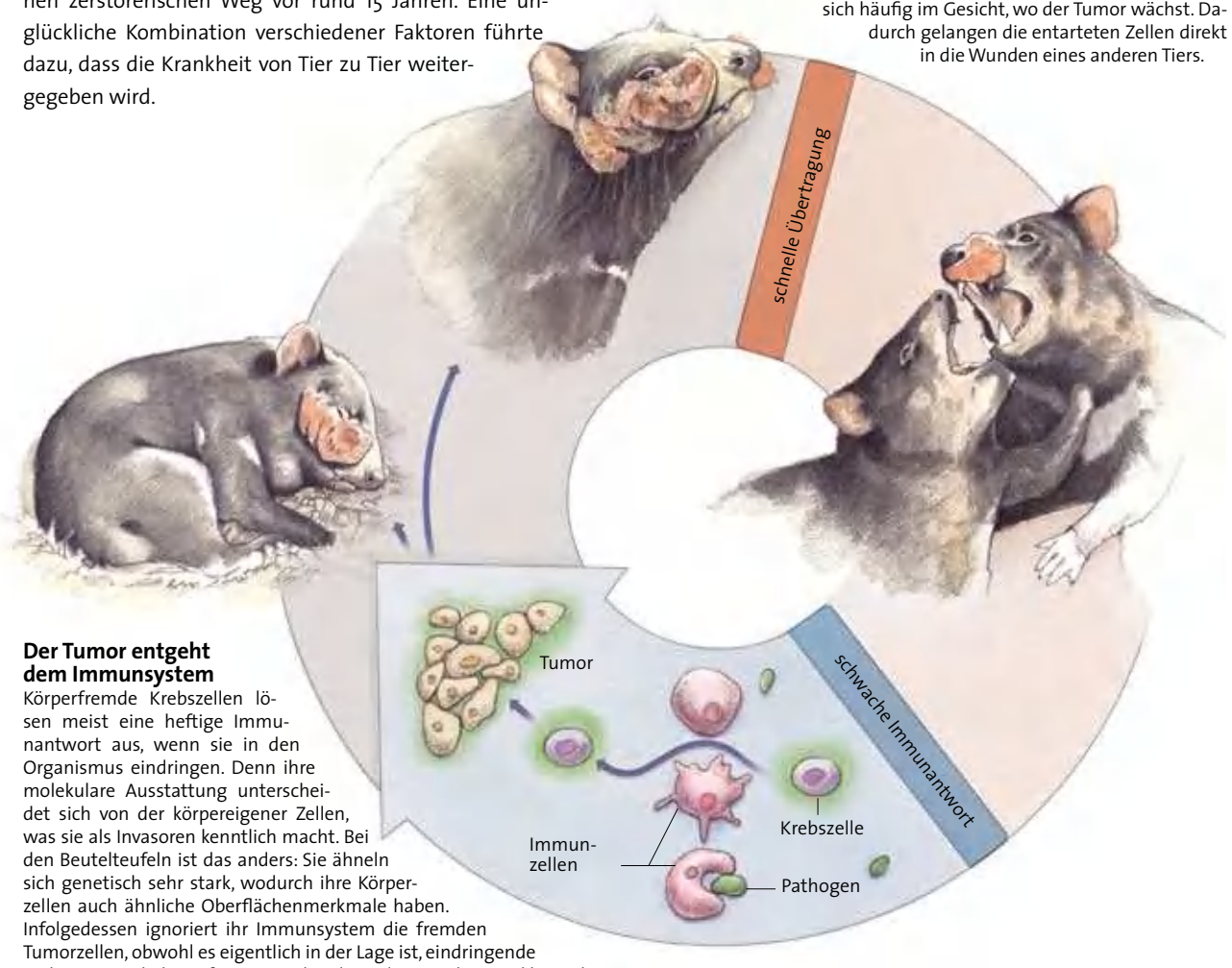


KARTE: MIKE SUDAL; FOTO OBEN: RODRIGO HAMEDE, UNIVERSITY OF TASMANIA

Wie Krebs ansteckend wird

Der Tumor, der sich heute unter den Beutelteufeln verbreitet, stammt von einem einzigen Tier und begann seinen zerstörerischen Weg vor rund 15 Jahren. Eine unglückliche Kombination verschiedener Faktoren führte dazu, dass die Krankheit von Tier zu Tier weitergegeben wird.

Die Krebszellen wechseln leicht auf andere Individuen über
An der Luft sterben Krebszellen schnell ab. Die Ansteckung kann deshalb nur durch rasches Übertragen von Körper zu Körper erfolgen. Bei den Beutelteufeln ist das gegeben: Die Tiere beißen sich häufig im Gesicht, wo der Tumor wächst. Dadurch gelangen die entarteten Zellen direkt in die Wunden eines anderen Tiers.



Der Tumor entgeht dem Immunsystem
Körperfremde Krebszellen lösen meist eine heftige Immunantwort aus, wenn sie in den Organismus eindringen. Denn ihre molekulare Ausstattung unterscheidet sich von der körpereigener Zellen, was sie als Invasoren kenntlich macht. Bei den Beutelteufeln ist das anders: Sie ähneln sich genetisch sehr stark, wodurch ihre Körperzellen auch ähnliche Oberflächenmerkmale haben. Infolgedessen ignoriert ihr Immunsystem die fremden Tumorzellen, obwohl es eigentlich in der Lage ist, eindringende Pathogene zu bekämpfen. Am Ende erliegt das Tier der Krankheit, aber zuvor hat es den Krebs an Artgenossen weitergegeben.

ILLUSTRATION: MIKE SUDAL

Sowohl bei den Gesichtstumoren der Beutelteufel als auch beim Sticker-Sarkom der Hunde mussten also zwei Faktoren zusammenkommen, damit der Krebs ansteckend wurde: enger Körperkontakt, der eine Übertragung lebender Zellen ermöglicht, und geringe genetische Vielfalt. Vermutlich tritt diese Kombination in der Natur recht häufig auf. Sämtliche Vögel und Säugetiere kämpfen und kopulieren, und in vielen Populationen herrscht starke Inzucht. Es ist somit vorstellbar, dass übertragbare Tumoren relativ oft entstehen, aber meist nicht lange erhalten bleiben – etwa, weil die infizierten Populationen und damit auch die Krebszellen schnell aussterben.

Beim Sticker-Sarkom gelingt es den Tumoren zunächst, sich vor dem Immunsystem der Hunde zu »verstecken«. Später erkennt die Körperabwehr die bösartigen Zellen zwar und zerstört sie, so dass die Tiere von nun an gegen weitere Infektionen geschützt sind, doch bis dahin können die Tumoren beim Kopulieren auf andere Individuen übergehen. Der infektiöse Krebs überlebt also dadurch, dass er seinen Wirt am Leben lässt. Möglicherweise sind noch andere ansteckende Krebserkrankungen im Umlauf, die auf diese Weise überdauern. Klarheit können hier im Einzelfall nur genetische Untersuchungen schaffen, wie man sie mit den Tumoren von Hunden und Tasmanischen Teufeln angestellt hat.

Wie wird es mit den Beutelteufeln weitergehen? Meist machen Wirte und Krankheitserreger in der Natur eine gemeinsame Evolution durch – beim Wirt entwickeln sich Anpassungen, durch die der Erreger besser unter Kontrolle gehalten wird, und Letzterer bildet wiederum Gegenmechanismen aus. Am Ende existieren beide nebeneinander. Gibt

es beim ansteckenden Krebs der Tasmanischen Teufel vielleicht auch Hinweise auf einen solchen Evolutionstanz, und erwächst daraus ein Hoffnungsschimmer für die Tiere? Tatsächlich, in den Jahren seit dem Auftauchen der Krebserkrankung hat sich bei den Wirtstieren bereits eine Reaktion eingestellt: Die Beutelteufel werden schon als »Teenager« sexuell aktiv. Früher begannen die Weibchen im Alter von ungefähr zwei Jahren mit der Fortpflanzung und zogen während ihrer fünf bis sechs Lebensjahre drei Würfe groß. Heute ziehen oft schon einjährige Weibchen ihren ersten Wurf auf, vorausgesetzt, sie wachsen in den Monaten nach der Entwöhnung schnell genug heran und sie bekommen ihre Jungen, bevor der Winter hereinbricht. Diese frühzeitige Fortpflanzung verschafft ihnen die Gelegenheit, wenigstens einmal und vielleicht sogar zweimal Junge zu werfen, bevor sie dem Krebs zum Opfer fallen. Über ausreichend lange Zeiträume hinweg kann dieses Verhalten dazu beitragen, die Spezies zu stabilisieren.

Haben die Beutelteufel doch noch eine Chance?

Zusammen mit unserem Doktoranden Rodrigo Hamede untersuchen wir Tiere im abgelegenen Nordwesten Tasmaniens. Sie unterscheiden sich in vielen genetischen Merkmalen von den weiter östlich nachzuweisenden Formen und haben offenbar auch eine höhere Widerstandskraft gegen den ansteckenden Krebs. Der Tumor tritt in der Region seltener auf, und die infizierten Beutelteufel überleben dort trotz ihrer Erkrankung viel länger als im Osten Tasmaniens. Mehrmals im Jahr begeben wir uns in den nordwestlichen Teil der Insel, um die Entwicklung der Seuche zu beobachten und Gewebe- und Blutproben zu sammeln. Diese analysieren wir zusammen mit Katherine Belov von der University of Sydney und Greg Woods vom Menzies Research Institute Tasmania. Belov beschäftigt sich mit den Genen und Woods mit den Immunantworten; gemeinsam wollen sie herausfinden, ob bestimmte Kombinationen genetischer Varianten das Immunsystem der Tiere in die Lage versetzen, den Krebs besonders gut zu bekämpfen. Wenn wir solche widerstandsfähigen Genotypen finden, können wir vielleicht dazu beitragen, dass die »guten« Gene sich in den Wildbeständen verbreiten, etwa durch Auswildern von resistenten Tieren in anderen Teilen Tasmaniens. Auf diese Weise ließe sich womöglich die Erholung der Spezies beschleunigen.

Auch am Tumor selbst sind evolutionsbedingte Veränderungen zu erkennen. Nach Befunden von Anne-Maree Pearse vom Save the Tasmanian Devil Program (einer Initiative zur Erhaltung des Beutelteufels, die von den Regierungen Australiens und Tasmaniens finanziert wird) sind eine Reihe neuer Stämme entstanden. Das ist möglicherweise eine gute, vielleicht aber auch eine schlechte Nachricht. Einige Stämme könnten sich so entwickeln, dass sie weniger bösartig sind; andere wiederum könnten Resistenzen überwinden, die sich bei den Beutelteufeln entwickeln.

Einen gewissen Anlass zum Optimismus gibt die Vergangenheit des Sticker-Sarkoms. Wahrscheinlich war es anfangs sehr virulent, so wie heute die Beutelteufel-Krankheit, ließ aber während der gemeinsamen Evolution mit den Wirtstieren in seiner Gefährlichkeit nach. Das machte den Tumor insgesamt erfolgreicher, denn wegen der verminderten Virulenz konnten die Wirtstiere länger mit der Krankheit leben und sie auf mehr Artgenossen übertragen. Dieser Mechanismus macht plausibel, warum der Hundetumor zu dem wurde, was er heute ist: eine Krankheit, die in der Regel nicht tödlich verläuft.

Wir hoffen, dass die Tasmanischen Teufel, ausreichend guten Willen und Finanzmittel vorausgesetzt, vor dem Aussterben bewahrt werden können, damit sie ihre Rolle als Raubtiere an der Spitze der Nahrungskette in weiten Teilen ihres Verbreitungsgebiets weiter erfüllen. Ohne Beutelteufel würden sich die Ökosysteme dieser Regionen voraussichtlich dramatisch verändern. Beispielsweise könnten sich Räuber wie eingeschleppte Katzen und Füchse stärker vermehren, was wiederum mehrere andere Arten bedrohen würde. Ähnliche Vorgänge ließen früher schon mehrere kleine Beutelarten vom australischen Festland verschwinden; Tasmanien ist heute ihre letzte Zuflucht. ~

DIE AUTOREN

Menna E. Jones arbeitet als Future Fellow des Australian Research Council an der University of Tasmania. Mit ihren Forschungen über die Tasmanischen Teufel und deren ansteckenden Gesichtstumor unterstützt sie Naturschutzprogramme, die zum Ziel haben, den Bestand des Beutelteufels zu erhalten. **Hamish McCallum** erforscht seit vielen Jahren die Ökologie von Wildtieren. Er leitet die School of Environment an der Griffith University im australischen Bundesstaat Queensland. Zuvor war er als leitender Wissenschaftler an Maßnahmen zur Rettung des Beutelteufels beteiligt.

QUELLEN

Jones, M. E. et al: Conservation Management of Tasmanian Devils in the Context of an Emerging, Extinction-Threatening Disease: Devil Facial Tumor Disease. In: EcoHealth 4, S. 326–337, 2007

Jones, M. E. et al: Life-History Change in Disease-Ravaged Tasmanian Devil Populations. In: Proceedings of the National Academy of Sciences USA 105, S. 10023–10027, 2008

Lachish, S. et al: Evidence That Disease-Induced Population Decline Changes Genetic Structure and Alters Dispersal Patterns in the Tasmanian Devil. In: Heredity 106, S. 172–182, 2011

McCallum, H. et al: Transmission Dynamics of Tasmanian Devil Facial Tumor Disease May Lead to Induced Extinction. In: Ecology 90, S. 3379–3392, 2009

McCallum, H., Jones, M. E.: To Lose Both Would Look Like Carelessness: Tasmanian Devil Facial Tumour Disease. In: PLoS Biology 4, S. 1671–1674, 2006

WEBLINKS

www.scientificamerican.com/jun2011/cancer
Eine Fotostrecke und Videos von Tasmanischen Teufeln
www.tassiedevil.com.au/tasdevil.nsf
Informationen zum ansteckenden Gesichtstumor der Beutelteufel

Der Licht-Turbo – mehr Tempo für Datennetze

Licht breitet sich mit rund 300 000 Kilometer pro Sekunde aus – aber nur im Vakuum. Forscher können dieses Tempo mittlerweile fast beliebig reduzieren und in speziellen Materialien sogar Lichtpulse speichern. Doch ihre Fantasie reicht noch weiter: Neue optische Technologien könnten den weltweiten Datenverkehr deutlich beschleunigen.

Von Luc Thévenaz und Thomas Schneider

RECHTE: ISTOCKPHOTO / MARK WRAGG

»Es hat den Anschein, dass es sogar dem Licht schwerfällt, (das langsame Glas) zu durchdringen – so schwer, dass die Reise von eineinhalb Zentimetern durch dieses Material ungefähr eine Sekunde in Anspruch nimmt … Sie haben die Welt gesehen, wie sie eine Sekunde vorher, in der Vergangenheit, existierte!«

Was in Bob Shaws Roman »Augen der Vergangenheit« von 1972 noch reine Sciencefiction war, haben Forscher 30 Jahre später in die Realität umgesetzt. Die Verlangsamung von Licht ist einer der erstaunlichsten Fortschritte der Optik. Dank neuer Verfahren, die sich von dieser völlig unerwartet verfügbar gewordenen Technik inspirieren ließen, können wir schon in naher Zukunft die Kommunikationsnetze erheblich optimieren und neuartige photonische, also auf Lichtsignalen basierende Bauelemente mit geringem Energieverbrauch herstellen.

Die Grundidee mag zwar paradox erscheinen. Schließlich haben wir mühsam gelernt, in einer einzelnen optischen Faser tausende Gigabit pro Sekunde an Daten zu übertragen – und nun wollen wir das Licht verlangsamen, das diese Daten transportiert? Tatsächlich heißt das: Wir haben nun auch die Kontrolle über eine zuvor unzugängliche Variable der Lichtwelle erlangt, nämlich die Zeit. Dies ist für zahlreiche Anwendungen von größter Bedeutung. Denn indem wir ein Lichtsignal verlangsamen, können wir die darin enthaltene Information auch speichern – im Prinzip beliebig lange.

Alles begann mit einem Artikel, den ein Team der Harvard University um die Dänin Lene Hau 1999 in der Fachzeitschrift »Nature« veröffentlichte und der eine wahre Schockwelle in der Gemeinde der Physiker auslöste. Die Forscher hatten ein Gas auf eine Temperatur von einigen milliardstel Kelvin herabgekühlt und einen hindurchlaufenden optischen Puls mittels elektromagnetisch induzierter Transparenz (EIT, siehe Kasten S. 50) auf eine Geschwindigkeit von 17 Meter pro Sekunde abgebremst. Das sind gerade ein-

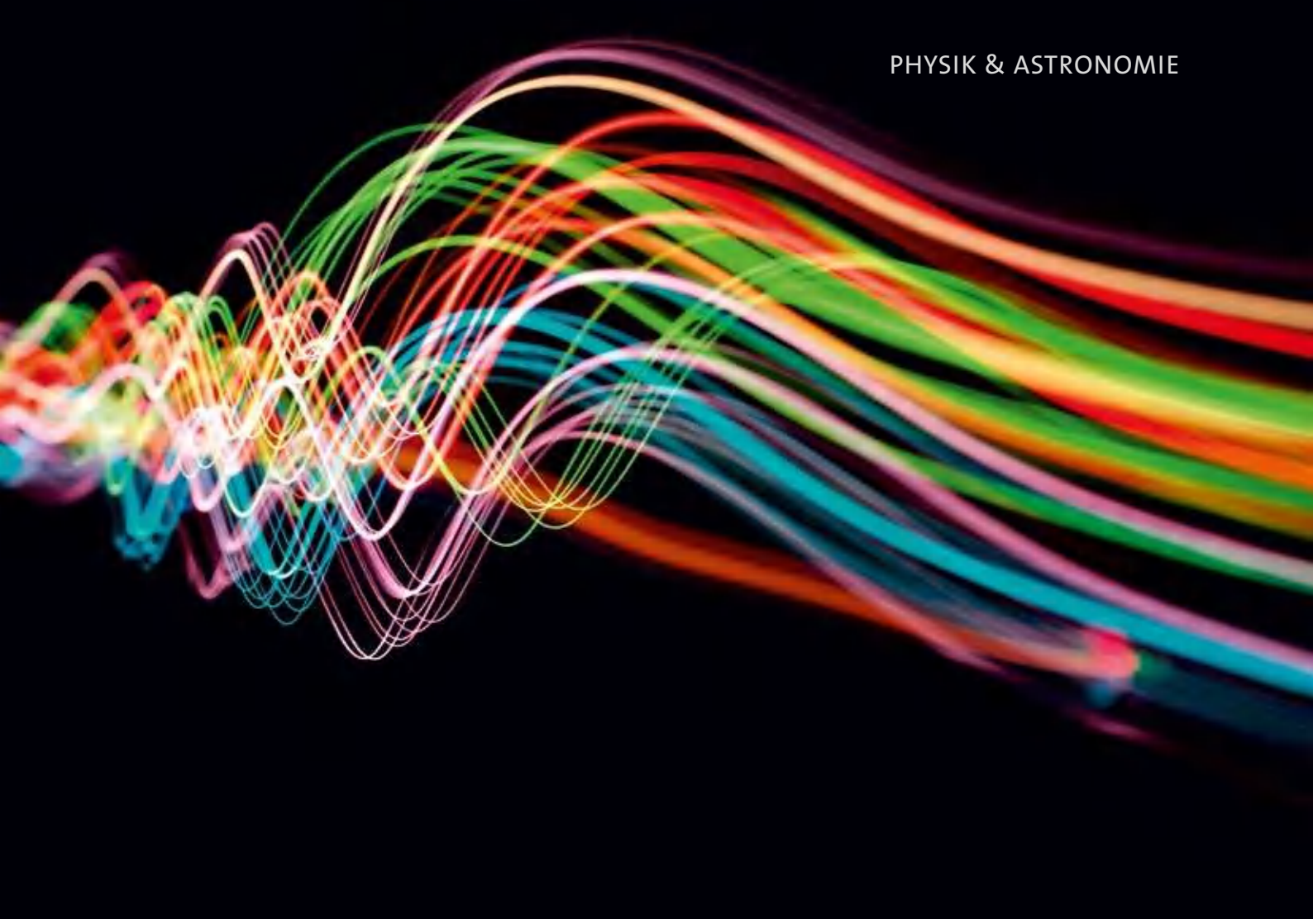
AUF EINEN BLICK

LOB DER LANGSAMKEIT

1 1999 gelang es Forschern erstmals, **Licht abzubremsen** – auf eine Geschwindigkeit von gerade einmal 17 Meter pro Sekunde. Damit ist es im Prinzip möglich geworden, Lichtpulse zu speichern. Dies wird in Kommunikationsnetzen dringend benötigt.

2 2004 schaffte es einer der Autoren dieses Beitrags erstmals, Licht auch in **Glasfaserkabeln** zu verzögern, dem Rückgrat der modernen Kommunikationsnetzwerke. Allerdings zeigte sich bald, dass der Anwendungsbereich der neuen Technik begrenzt ist.

3 Mittlerweile haben die Arbeiten über »langsames Licht« aber weitere unerwartete Fortschritte initiiert. Schon in naher Zukunft könnte die **Speicherung von Lichtsignalen** möglicherweise tatsächlich zu höheren **Datenübertragungsraten** führen.



1999 gelang es einem Team um die Dänin Lene Hau von der Harvard University erstmals, die Gruppengeschwindigkeit von Licht zu verlangsamen. Damals horchte auch die breite Öffentlichkeit auf: Licht schien gewissermaßen greifbar zu werden. Dies blieb zwar eine Illusion. Dennoch bahnte die Forschungsarbeit den Weg zu neuartigen optischen Netzwerken.

mal 61 Kilometer pro Stunde, das Tempo eines Radrennfahrers.

Den Forschern war es damit gelungen, die Ankunftszeit eines optischen Pulses kontrolliert zu verzögern, ihn gewissermaßen für eine kurze Zeit zu speichern. Zwar lässt sich die Ankunftszeit von Licht auch auf andere Weise variieren: Man sendet den Puls früher oder später aus, schickt ihn wahlweise durch längere oder kürzere optische Fasern oder lässt ihn auf einen Spiegel fallen, den man auf einem Schlitten verschieben kann, so dass sich der Lichtweg verkürzt oder verlängert. Für Telekommunikationssysteme kommen all diese Verfahren jedoch nicht in Frage. Indem Forscher nun aber erstmals die Geschwindigkeit des Lichts selbst manipulierten, eröffneten sich ihnen völlig neue Möglichkeiten.

Selbst außerhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft stieß die Entdeckung auf großes Interesse. Schließlich suggerierte sie, man könne die Ausbreitung eines optischen Pulses mit eigenen Augen beobachten – auch wenn der Effekt zunächst auf einer Wegstrecke von lediglich 0,23 Millimetern gemessen wurde und der Puls sich dabei um nur wenige Mikrosekunden verlangsamte.

Dass Licht gewissermaßen greifbar werden könnte, blieb allerdings aus vielerlei Gründen eine Illusion. Völlig klar war jedoch, dass seine zeitliche Steuerung zu wesentlich effizienterer Datenübertragung in optischen Netzwerken führen könnte. Weltweit begannen Forscher deshalb, sich dem Phänomen intensiv zu widmen.

Staus im Datenverkehr auflösen

Heute fließt der weitaus größte Teil des Daten- und Telefonverkehrs in Form optischer Signale durch Glasfasern. An Netzwerkknoten werden die Signale von Routern in Empfang genommen. Diese lesen die Adressinformationen der Datenpakete aus und entscheiden, in welche Richtung sie weitergeleitet werden müssen. Stauen sich die Pakete, muss der Router einige von ihnen zwischenspeichern, bis wieder Übertragungskapazitäten frei werden. Bei Datenraten von typischerweise 10 bis 40 Gigabit (Milliarden Informationsein-

So lässt sich Licht abbremsen

Elektromagnetisch induzierte Transparenz (EIT)

Das Verfahren der elektromagnetisch induzierten Transparenz beruht auf einem speziellen Material, das zunächst undurchlässig für das Licht eines Lasers ist. Durch einen zweiten Laserstrahl kann es aber »gepumpt« und damit in einem bestimmten Frequenzbereich transparent gemacht werden. Bei diesem Vorgang bildet sich in dem Material ein Brechungsindex aus, der linear mit wachsender Frequenz stark steigt oder fällt. Ein Medium mit linear frequenzabhängigem Brechungsindex ist wiederum die Voraussetzung dafür, dass sich die Gruppengeschwindigkeit von Lichtpulsen in diesem Medium verändert.

Grundlage der EIT ist ein Quanteneffekt. Der Pumplaser sorgt dafür, dass bestimmte energetische Übergänge in dem Material quantenmechanisch nicht mehr »erlaubt« sind, weil die Wahrscheinlichkeiten für ihr Eintreten destruktiv interferieren. Die Frequenzen des ersten Strahls können die Übergänge nun nicht mehr anregen, er behält also seine Energie und durchquert das Material ungehindert. In genau diesem Frequenzbereich entsteht der gewünschte Verlauf des Brechungsindex.

Kohärente Besetzungsoszillation (CPO)

Normalerweise befinden sich die meisten Elektronen eines Festkörpers auf einem niedrigen Energieniveau und nur wenige auf einem höheren. Bei der kohärenten Besetzungsoszillation oder Coherent Population Oscillation (CPO) sorgt ein Pumplaser dafür, dass sich die Verhältnisse umkehren. Anschließend lassen die Forscher entlang des Mediums zwei Strahlen mit unterschiedlichen, aber nah beieinanderliegenden Frequenzen miteinander interferieren. Das entstehende Schwingungsmuster, eine Schwebung, sorgt dafür, dass die Elektronen periodisch von einem Energieniveau auf das andere wechseln. Die mathematische Analyse des Vorgangs zeigt, dass dies zu einem sich linear mit der Frequenz verändernden Brechungsindex führt, der die Gruppengeschwindigkeit von durch das Medium laufenden Lichtpulsen beeinflusst.

Stimulierte Brillouin-Streuung (SBS)

Mit der stimulierten Brillouin-Streuung (SBS) lassen sich sehr hohe Verzögerungen der Gruppengeschwindigkeit von Licht erzielen. Innerhalb eines Mediums treten dabei zwei optische Wellen miteinander in Wechselwirkung. Sie besitzen leicht unterschiedliche Frequenzen und breiten sich in entgegengesetzter Richtung aus. Normalerweise wird die Welle mit der höheren Frequenz als Pumpwelle bezeichnet, während die Welle mit der niedrigeren Frequenz das Signal bildet. Wie bei der CPO entsteht auch hier durch Interferenz eine Schwebung, die sich entlang des Mediums ausbreitet.

Unter bestimmten Umständen kann die Wechselwirkung der Schwebung mit dem Material dazu führen, dass darin eine Schallwelle entsteht – mit einer Frequenz, die eine Million Mal höher ist als die des höchsten Tons, den ein Mensch hören kann. Die Schallwelle ändert periodisch die Dichte des Mediums, die wieder auf die optischen Wellen zurückwirkt. Auf diese Weise wird ein Teil der Pumpleistung an das Signal transferiert, dessen Amplitude dadurch steigt. Die so genannten Kramers-Kronig-Beziehungen sagen nun aus, dass eine Amplitudenänderung (also Verstärkung oder Dämpfung) zu einer Phasenänderung und damit zu einer Änderung des Brechungsindex führt. Ist diese Änderung stark genug und verläuft sie linear mit der Frequenz, lässt sich so die Gruppengeschwindigkeit verändern.

heiten pro Sekunde) und Datenpaketen, die wie beim Internet typischerweise aus 1000 Bit und mehr bestehen, beträgt die Mindestverzögerung 25 bis 100 Nanosekunden. In dieser Zeit kann eines der Pakete vollständig gesendet werden und so den Weg für das nächste frei machen.

Bislang verwandeln die Router die ankommenden optischen Impulse stets in elektronische Signale. Nur so können sie die Adressdaten auslesen und die Pakete gegebenenfalls zwischenspeichern. Anschließend erfolgt deren Rückverwandlung in optische Signale. Der Vorgang ist aber langsam und erfordert zudem teure Hardware, die viel Energie verbraucht. Lässt er sich optimieren?

Ein Teil der Lösung besteht in Verfahren, mit denen sich optische Signale zwischenspeichern lassen, ohne sie umwandeln zu müssen. Viele Forscher setzten nach der epochalen »Nature«-Veröffentlichung ihre Hoffnungen auf langsames Licht. Tatsächlich gelangen damals sehr schnell erhebliche Fortschritte. Im Jahr 2003 veröffentlichten Matthew Bigelow, Nick Lepeshkin und Robert Boyd von der University of Rochester im US-Bundesstaat New York ihre Ergebnisse. Sie hatten Licht in einem optischen Kristall mit Hilfe der kohärenten Besetzungsoszillation (CPO, siehe Kasten oben) stark verlangsamt – und das sogar schon bei Raumtemperatur.

Der entscheidende Schritt gelang kurz darauf, zunächst an der Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) unter Leitung eines der Autoren (Thévenaz) und – unabhängig davon – ein paar Monate später einer Forschergruppe in den USA um Robert Boyd, Daniel Gauthier und Alexander Gaeta. Mit Hilfe der stimulierten Brillouin-Streuung (SBS, siehe Kasten oben) schafften wir es im September 2004 erstmals, langsames Licht direkt in einer optischen Faser zu erzeugen – also in genau dem Medium, welches das Rückgrat der modernen Telekommunikationsnetze bildet!

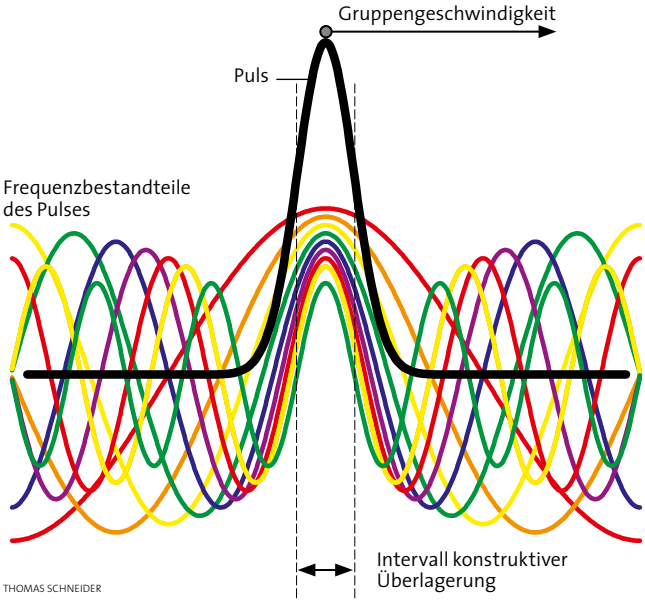
Die meisten Menschen verbinden das Wort Lichtgeschwindigkeit mit der speziellen Relativitätstheorie von Albert Einstein und mit dem konstanten Wert von rund $3 \cdot 10^8$ Meter pro Sekunde. Doch bereits um das Jahr 1910 herum diskutierten Forscher darüber, ob in einem Medium gegen Einsteins Postulat verstoßen werden kann, dem zufolge sich Signale nie schneller als mit Lichtgeschwindigkeit aus-

breiten dürfen. Denn bei theoretischen Überlegungen waren sie darauf gestoßen, dass in Medien Geschwindigkeiten auftreten könnten, die deutlich höher (oder auch niedriger) sind als die $3 \cdot 10^8$ Meter pro Sekunde, die Licht im Vakuum zurücklegt.

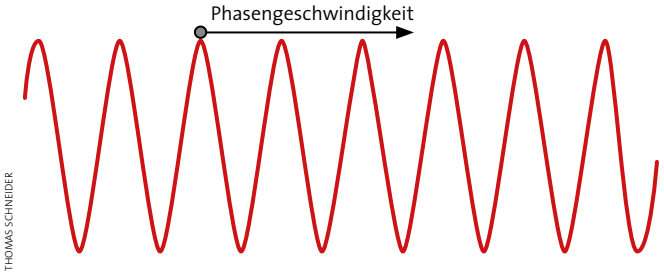
1914 zeigten dann Arnold Sommerfeld und Léon Brillouin in Beiträgen für die Leipziger »Annalen der Physik«, dass sich in einem Medium tatsächlich fünf verschiedene Lichtgeschwindigkeiten unterscheiden lassen: Phasen-, Gruppen- und Informationsgeschwindigkeit (die auch als Signalgeschwindigkeit bezeichnet wird) sowie Front- und Schlussgeschwindigkeit. Anders als im Vakuum treten die Lichtwellen in einem Medium nämlich in Wechselwirkung mit den Teilchen, aus denen dieses besteht. Dadurch verändern sich die Eigenschaften der Wellen. Die einzige der genannten Geschwindigkeiten, die nicht schneller als die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum werden darf, ist die Informationsgeschwindigkeit: Denn würden Informationen schneller als mit Lichtgeschwindigkeit übertragen, könnte laut spezieller Relativitätstheorie der Absender einer Nachricht die Antwortsignale schon dann erhalten, wenn er die Nachricht noch gar nicht gesendet hat. Damit käme die Wirkung zeitlich vor die Ursache zu liegen, was dem Kausalprinzip widerspricht. Die übrigen Geschwindigkeiten sind jedoch überraschend variabel.

Wechselwirkung mit Elektronen bremst das Licht

Ein Lichtpuls besteht aus der Überlagerung langer Züge von Sinusschwingungen, die jeweils unterschiedliche Amplitude, Frequenz und Phase besitzen. Die Phase gibt dabei an, in welchem Abschnitt einer Schwingungsperiode sich die Welle an einem bestimmten Ort befindet, beispielsweise an einem Maximum oder im Nullpunkt. An einem bestimmten Ort zu einer bestimmten Zeit überlagern sich all diese Schwingungen konstruktiv – zum Beispiel fallen Maxima auf Maxima –, so dass innerhalb eines kleinen Intervalls in der Summe eine Pulsform entsteht (Grafik rechts oben). Außerhalb des Intervalls kommt es hingegen zu einer destruktiven Überlagerung. Dort sind die einzelnen Sinusschwingungen im Prinzip zwar vorhanden, löschen sich aber gegenseitig aus.



Ein Lichtpuls (schwarz) besteht aus einer Vielzahl von Wellenzügen mit unterschiedlichen Frequenzen (farbig), die einander überlagern. Nur in einem bestimmten Intervall (gestrichelt) geschieht dies so, dass sie in der Summe die beobachtete Pulsform annehmen (konstruktive Überlagerung). Außerhalb davon löschen sie sich gegenseitig aus (destruktive Überlagerung). Die Geschwindigkeit, mit der sich der Puls als Ganzes fortbewegt, ist die Gruppengeschwindigkeit. Im Fall einfacher Pulsformen ist sie identisch mit der Geschwindigkeit des Pulsmaximums.



Bewegt sich Licht nicht im Vakuum, sondern durch ein Medium, lässt sich seine Geschwindigkeit auf unterschiedliche Weise definieren. Die so genannte Phasengeschwindigkeit des Lichts ist im Fall einer einzelnen Welle diejenige, mit der sich zum Beispiel die Maxima der Welle fortbewegen.

Für einzelne Wellenzüge (Grafik links unten) lässt sich keine Ausbreitungsgeschwindigkeit definieren. Allerdings kann man die so genannte Phasengeschwindigkeit bestimmen, mit der sich eine bestimmte Phasenlage eines Wellenzugs wie zum Beispiel ein Maximum fortbewegt. In einem Medium bewegt sich Licht jedoch mit anderer Geschwindigkeit als im Vakuum, weil die Teilchen im Medium, vor allem die Elektronen, durch die Lichtwelle in Bewegung versetzt werden. Sie strahlen daraufhin ihrerseits Licht aus, das eine andere Phase als die Ursprungswelle besitzt. Sobald sich beide Wellen überlagern, entsteht eine Welle mit neuen Eigenschaften, insbesondere auch mit veränderter Phasengeschwindigkeit. Je nach Brechungsindex des Materials kann die Phasengeschwindigkeit in diesem Material sowohl schneller als auch langsamer sein als die Phasengeschwindigkeit im Vakuum.

Auch wenn man Licht nicht als Welle auffasst, sondern als Teilchenstrahlung, lässt sich die Veränderlichkeit der Phasengeschwindigkeit in einem Medium verstehen. Die Atome absorbieren die Photonen, werden dadurch angeregt und strahlen ihrerseits wieder Photonen aus, dies allerdings zeitversetzt, was einer Verzögerung entspricht. Die Lichtteilchen selbst werden dadurch nicht abgebremst; zwischen den Ato-

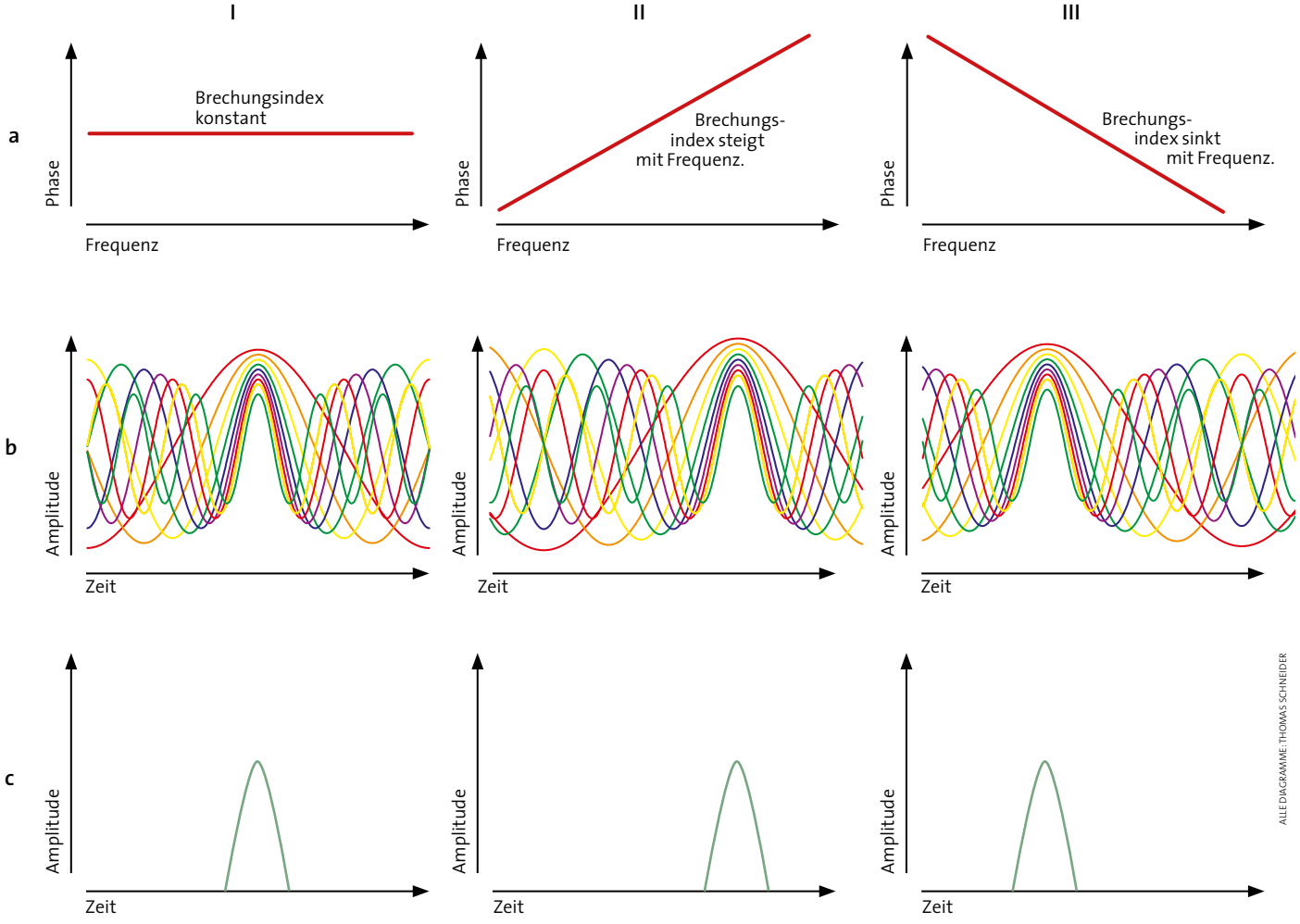
men bewegen sie sich stets mit rund $3 \cdot 10^8$ Meter pro Sekunde.

Für die Datenübertragung ist immer der Puls als Ganzes entscheidend. Er schreitet fort, weil sich der Ort, an dem sich die einzelnen Wellenzüge konstruktiv überlagern, mit der Zeit verändert. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der konstruktiven Überlagerung wird als Gruppengeschwindigkeit bezeichnet und ist bei einfachen Pulsformen identisch mit der Geschwindigkeit, mit der sich das Maximum des Pulses im Medium ausbreitet (siehe Grafik auf S. 51 oben). Auch die Gruppengeschwindigkeit kann größer oder kleiner als die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum und sogar negativ werden – und es ist allein diese Geschwindigkeit, die von den in diesem Artikel beschriebenen Verfahren modifiziert wird.

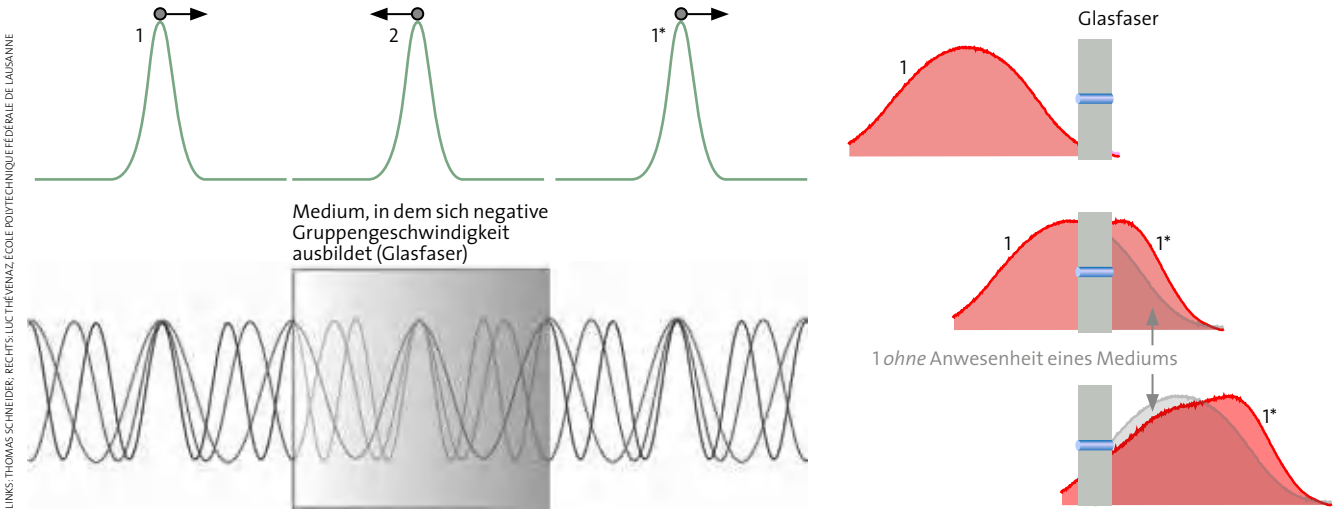
Was geschieht nun, wenn ein Lichtpuls in ein Medium eintritt? Der Brechungsindex des Mediums unterscheidet sich in der Regel für jede der eintreffenden Frequenzen, weshalb sich jede einzelne der Wellen, aus denen der Puls zusammengesetzt ist, mit einer anderen Phasengeschwindigkeit im Medium ausbreitet. Dies führt dazu, dass sich der Puls zeitlich verbreitert oder im Extremfall ganz auseinanderläuft. Doch unter besonderen Umständen – nämlich dann, wenn sich der Brechungsindex linear mit der Frequenz verändert – verschiebt sich lediglich das Intervall, in dem die Einzelwellen konstruktiv interferieren, in der Zeit. Der Puls selbst bleibt also erhalten, befindet sich nun aber an einem anderen Ort. Das heißt nichts anderes, als dass er sich infolge des veränderten Brechungsindex mit veränderter Geschwindigkeit bewegt.

Die Geschwindigkeitsdifferenz ist dabei umso größer, je stärker sich der Brechungsindex mit der Frequenz verändert. Steigt er mit der Frequenz, wird der Puls verzögert (Grafik

In einem Medium mit konstantem Brechungsindex bewegt sich ein Puls mit einer bestimmten Gruppengeschwindigkeit fort (Spalte I). Steigt jedoch der Brechungsindex mit der Frequenz, verschiebt dies die Phasen der einzelnen Frequenzen, aus denen der Puls besteht (II b, II c). Das Resultat ist ein in der Zeit nach hinten verschobener, also verzögerter Puls; seine Gruppengeschwindigkeit sinkt. Sinkt der Brechungsindex hingegen mit der Frequenz, wird der Puls in der Zeit nach vorne verschoben, also beschleunigt (III b, III c); seine Gruppengeschwindigkeit wächst.



ALLE DIAGRAMME: THOMAS SCHNEIDER



LINKS: THOMAS SCHNEIDER; RECHTS: LUC THÉVENAZ, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Kann eine Wirkung ihrer Ursache vorausgehen? Die vereinfachende Grafik zeigt einen sehr speziellen Fall. Ein Lichtpuls 1 läuft auf ein Medium zu, in dem sich eine negative Gruppengeschwindigkeit ausbildet, weil die Frequenzabhängigkeit seines Brechungsindex extrem hoch ist. Puls 1 ist in genau dem Intervall zu beobachten, in dem sich lange Wellen unterschiedlicher Frequenzen (rot, grün, blau) konstruktiv überlagern. Der frequenzabhängige Brechungsindex lässt die grüne Welle unbeeinflusst, verkürzt aber die Länge der roten und verlängert die der blauen Welle. Dadurch tritt konstruktive Interferenz auch an anderen Orten auf. Neben Puls 1 sind nun – noch bevor er ganz in das Medium eingetreten ist! – zwei weitere Pulse zu sehen: ein rückwärtslaufender Puls 2 innerhalb des Mediums sowie ein Puls 1*, der vom Ende des Mediums her nach rechts läuft. Die Grafik rechts zeigt Messdaten von einem der Autoren (Thévenaz). Noch bevor das Maximum von Puls 1 das Medium erreicht, tritt das Maximum von Puls 1* aus dem Medium aus. Puls 2 ist nicht dargestellt. Puls 1 wird also beim Durchgang durch das Medium, das im Experiment zwei Meter lang war, zu einem leicht deformierten und schnelleren Puls 1*. Grau ist dargestellt, wie Puls 1 zu diesem Zeitpunkt *ohne* Anwesenheit eines Mediums aussähe. Das Kausalitätsprinzip wird durch diese Phänomene nicht verletzt.

links, Spalte II); sinkt er mit der Frequenz, wird der Puls beschleunigt (Spalte III).

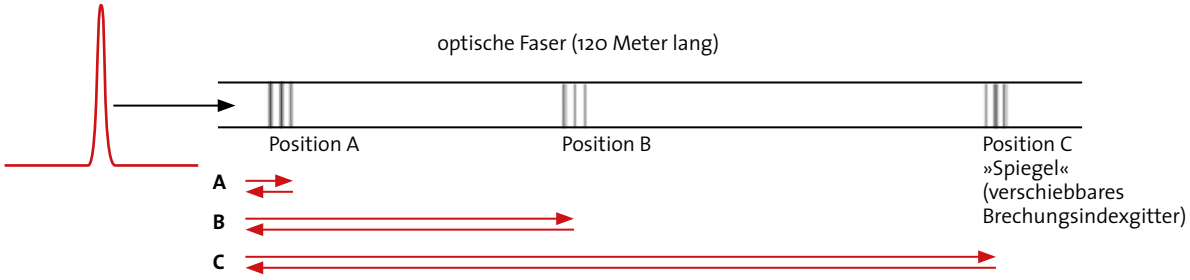
Ist die Veränderung des Brechungsindex groß genug, kann die Gruppengeschwindigkeit sogar negativ werden. Dieser Fall ist so faszinierend und scheint dem gesunden Menschenverstand so sehr zu widersprechen, dass wir ihn – auch wenn er keine Bedeutung für die Praxis spielt – hier vorstellen wollen. Dabei kommt es zu folgender Situation (Grafiken oben): Noch bevor das Maximum des Pulses den Anfang des Mediums erreicht hat, bilden sich am Ende des Kabels zwei Kopien. Die eine Kopie des Pulses bewegt sich von dort aus weiter in der Ausbreitungsrichtung des ursprünglichen Pulses, die andere Kopie läuft in entgegengesetzter Richtung zum Anfang des Mediums.

Dieses erstaunliche Verhalten scheint auf den ersten Blick das Kausalitätsprinzip zu verletzen: Noch bevor die Ursache am Anfang des Mediums zu sehen ist, sieht man bereits eine Wirkung am Ausgang. Doch natürlich wird das Kausalitätsprinzip auch in einem Medium mit negativer Gruppengeschwindigkeit nicht ausgehebelt. Diese sorgt nur dafür, dass sich das Intervall der konstruktiven Überlagerung verschiebt. Vielmehr sind die einzelnen Frequenzen schon vor dem Puls am Ausgang des Mediums präsent, löschen einander aber zunächst destruktiv aus.

Wie stark sich die Gruppengeschwindigkeit verändern lässt, die in einer typischen Glasfaser 205 000 Kilometer pro Sekunde beträgt, konnten wir bereits vor einigen Jahren zeigen. Im Dezember 2004 gelang es dem Team um einen der Autoren (Thévenaz), mit Hilfe der stimulierten Brillouin-Streuung die Gruppengeschwindigkeit in einer zwei Meter langen Faser zwischen rund 70 500 Kilometer pro Sekunde und einer negativen Geschwindigkeit von minus 428 000 Kilometer pro Sekunde zu variieren. Verglichen mit einem Puls unter »normalen« Umständen trat das Pulsmaximum dabei 18,6 Nanosekunden (milliardstel Sekunden) später beziehungsweise 14,4 Nanosekunden früher aus der Faser aus.

Mitgerissen vom Licht

Die meisten Methoden, um langsames Licht zu erzeugen, beruhen auf den so genannten Resonanzfrequenzen eines Mediums. Das ins Medium einfallende Licht kann die an einen Atomrumpf gebundenen Elektronen dazu anregen, gegen den Rumpf zu schwingen. In der Regel existieren dann Frequenzbereiche, so genannte Resonanzen, in denen sich das System leicht zu sehr starken Schwingungen anregen lässt. Liegt die Frequenz der einfallenden Lichtwelle im Bereich einer der Resonanzfrequenzen, werden die Teilchen besonders stark von ihr »mitgerissen«. Dabei entziehen sie der Welle



LUC THÉVENAZ, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Forscher können Lichtpulse auch ganz einfach dadurch verzögern, dass sie ihre Laufzeit verlängern. Die Grafik zeigt das Grundprinzip eines Experiments an der EPFL in Lausanne. Ein Puls tritt von links in eine optische Faser ein und wird dort an einem verschiebbaren »Spiegel« reflektiert. Er lässt sich also während genau der Zeit »speichern«, die er benötigt, um wieder aus der Faser auszutreten. Als Spiegel fungiert ein so genanntes Brechungsindexgitter, das an einem frei wählbaren Ort innerhalb der Faser durch die Überlagerung zweier von außen eingestrahlter Lichtwellen entsteht.

viel Energie, so dass das Licht stark gedämpft wird. Diese starke Dämpfung der Welle sorgt gemäß den so genannten Kramers-Kronig-Beziehungen für die lineare Veränderung des Brechungsindex und damit für die Beschleunigung des Pulses.

Der Puls lässt sich aber auch verzögern, indem man die Welle wie im Fall der stimulierten Brillouin-Streuung in einer optischen Faser verstärkt. Auch hier führt eine Amplitudenänderung (also Verstärkung oder Dämpfung) zu einer Phasenänderung und damit zu einer Änderung des Brechungsindex, die wiederum die Gruppengeschwindigkeit beeinflusst.

Für all diese Verfahren gilt: Je stärker sie die Signalamplitude verändern, desto stärker beeinflussen sie die Gruppengeschwindigkeit. Dabei führen Amplitudenverstärkungen zu einer Signalverzögerung, umgekehrt beschleunigt eine Dämpfung das Signal. Die Amplitudenänderung lässt sich in der Regel einfach dadurch variieren, dass man die Leistung des Pumplasers, der das Medium »aktiviert«, erhöht oder erniedrigt.

Im Extremfall bleibt das Licht stehen

Neben den oben erwähnten Resonanzen kann man die Bandlücke eines Mediums nutzen, um die Gruppengeschwindigkeit eines optischen Pulses zu verändern. Diese Lücke ist ein Energiebereich, in dem sich aus quantenmechanischen Gründen weder bewegliche noch gebundene Elektronen aufhalten können. Durch periodische Strukturen wie Bragg-Gitter, gekoppelte Resonatoren oder photonische Kristalle lässt sich ein derartiger »verbotener« Frequenzbereich auch für Photonen künstlich schaffen. Liegen die Frequenzen und damit die Energien eines elektromagnetischen Pulses im Bereich der Grenzen der Bandlücke, verändert sich die Gruppengeschwindigkeit stark und im Extremfall sogar zu null.

Diese Art des langsamen Lichts, bei der das Medium mit künstlichen makroskopischen Strukturen ausgestattet wird, bezeichnen Wissenschaftler als »strukturell«. Hingegen beruht »materielles« langsames Licht auf dem mikroskopischen Verhalten des Materials. Die strukturellen Systeme haben den Vorteil, dass sie Licht verzögern können, ohne dass man ihnen Energie zuführen müsste. Das Maß der Verzögerung lässt sich jedoch nicht mehr nachträglich variieren, da es in die Struktur eingefroren ist.

Darüber hinaus ist die Technik weiteren Grenzen unterworfen. So hängt beim materiellen langsamen Licht das Maß der Verlangsamung von der Resonanzbreite ab. Diese Größe beschreibt das Maß, in dem eine Resonanz nicht nur bei einer ganz bestimmten Frequenz, sondern auch bei Nachbarfrequenzen auftritt. Es gilt: Je schmaler die Resonanzbreite, desto größer ist die Verlangsamung. Das ist allerdings auch die Achillesferse der Technik. Denn eine schmale Resonanz bedeutet zugleich, dass Signalanteile mit hoher Frequenz verloren gehen. Das Signal wird also umso stärker verzerrt, je stärker man es verzögert.

Eine wichtige Kenngröße der Kommunikationstechnik ist das Produkt aus Verzögerung und Bandbreite. Man stelle sich eine Glasfaser vor, die eine Million Bits pro Sekunde transportiert. In der Faser verzögern bestimmte Effekte die Signale um jeweils 50 Millisekunden. Das Produkt aus den beiden Zahlen beträgt 50 000 Bit. Genau diese Datenmenge ist also in der Glasfaser »gespeichert« – dadurch, dass an ihrem Eingang stets Daten nachgeliefert, aber erst mit Verzögerung wieder am Ausgang weitergereicht werden.

Mittlerweile wissen wir jedoch, dass bei materiellem langsamem Licht, das nur einen einzelnen schmalen Frequenzbereich für Verstärkung oder Dämpfung nutzt, das Verzögerung-Bandbreite-Produkt aus prinzipiellen Gründen immer etwa eins beträgt. Ein Signal lässt sich also maximal um ein Bit verzögern. Beim strukturellen langsamen Licht wiederum erzielt man zwar an der Grenze der Bandlücke hohe Verzögerungen, doch wird das Signal dort gleichzeitig stark gedämpft. Auch hier erreicht man etwa ein Bit, dann aber dominiert die Dämpfung, und das Signal geht im Rauschen unter.

Im Jahr 2007 konnte ein Team um einen der Autoren (Schneider) am Institut für Hochfrequenztechnik (IfH) der Hochschule für Telekommunikation in Leipzig nachweisen,

dass man diese Grenze beim materiellen langsamen Licht auf immerhin vier Bit erhöhen kann. Und ein Jahr später zeigte Andrea Melloni vom Politecnico di Milano, wie sich mit strukturellem langsamem Licht in einem System aus acht gekoppelten Ringresonatoren acht Bit erreichen lassen.

Aus Anwendungssicht sind allerdings auch diese Grenzen viel zu niedrig. Moderne elektronische Router besitzen eine Speicherkapazität von zum Beispiel 10 Gigabit bei Datenraten von 40 Gigabit pro Sekunde. Von solchen Werten sind optische Router auf Basis von langsamem Licht weit entfernt.

Die Forscher begannen darum umzudenken und nach anderen Anwendungen zu suchen. So stellte sich schnell heraus, dass langsames Licht eine wichtige Rolle in der Mikrowellenphotonik spielen kann. Dabei wird eine optische Trägerwelle mit einer Frequenz in der Größenordnung von 10^{14} Hertz verwendet, die durch ein Mikrowellensignal mit einer Frequenz von einigen 10^9 Hertz moduliert ist, aber ganz normal in einer Glasfaser übertragen werden kann. Für die Verarbeitung eines solchen analogen Signals ist es normalerweise nicht nötig, Zeitverzögerungen zu erzeugen, die größer sind als eine Periode der Trägerwelle. Das entspricht aber genau dem Verzögerung-Bandbreite-Produkt, das sich mit langsamem Licht erzielen lässt. Das europäische Projekt GOSPEL (»Governing the speed of light«), dem einer der Autoren (Thévenaz) angehört, hat mit dieser Technik komplexe Filter und Mikrowellengeneratoren hoher Stabilität entwickelt, die über weite Frequenzbereiche abstimmbar sind und beispielsweise in Radarsystemen oder Mobilfunknetzen zum Einsatz kommen können.

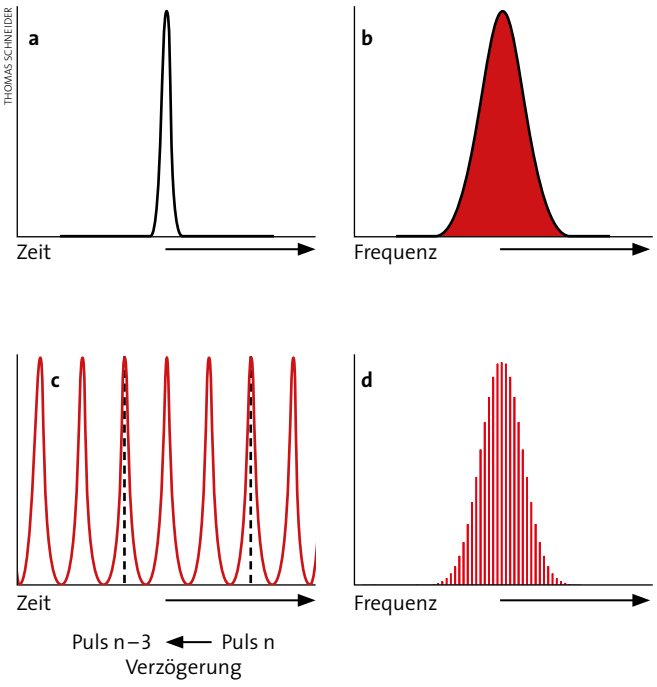
Gestautes Licht verstärkt nichtlineare Effekte

Weitere unerwartete Anwendungen resultieren aus der höheren Energiedichte von langsamem Licht. In einem durchsichtigen Medium ist die Geschwindigkeit, mit der die Energie der Lichtwelle übertragen wird, identisch mit der Gruppengeschwindigkeit. Senkt man in einem Medium für strukturelles langsames Licht also die Gruppengeschwindigkeit, sinkt auch die Geschwindigkeit, mit der die Energie des Lichts übertragen wird. Folglich steigt aber, weil sich das Licht gewissermaßen staut, die Dichte der optischen Energie. Davon wiederum profitieren eine Reihe nichtlinearer optischer Effekte im Medium, die umso stärker sind, je höher die Energiedichte ist.

Systeme, die auf solchen Effekten basieren – wie optische Schalter oder Geräte, welche die Frequenz einer Trägerwelle in eine andere Frequenz umwandeln –, lassen sich dank dieses Effekts nun viel kleiner bauen oder benötigen deutlich weniger Energie. Auch elektrooptische Modulatoren, welche die Phase von Lichtwellen verändern, und optische Schalter auf Basis des strukturellen langsamen Lichts haben Forscher bereits entwickelt.

Die Arbeit mit langsamem Licht hat aber auch gänzlich neue Ideen für die Optimierung digitaler Kommunikationsnetze hervorgebracht. Sie besitzen großes Potenzial, so dass wir die ursprünglich gesetzten Ziele vielleicht doch noch verwirklichen könnten. So gelang es, Verzögerungen von mehr als 1000 Bit bei Datenraten von zehn Gigabit pro Sekunde zu erreichen. Der genaue Wert ließ sich dabei ohne elektronische Umwege allein mittels optischer Verfahren einstellen. Das Prinzip beruht darauf, dass die Gruppengeschwindigkeit in einer Glasfaser von der Wellenlänge der Trägerwelle abhängt. Pulse mit einer Trägerwellenlänge von 1550 Nanometern bewegen sich schneller durch die Faser, als wenn ihre Trägerwellenlänge beispielsweise 1560 Nanometer beträgt. Indem man also die Wellenlänge der Trägerwelle verändert – etwa durch den nichtlinearen optischen Effekt der Vierwellenmischung –, lässt sich die gewünschte Verzögerung variabel einstellen. Am Ende muss dann wieder die ursprüngliche Trägerwelle erzeugt werden.

Prinzipiell könnten solche Verfahren in digitalen Kommunikationsnetzen zum Einsatz kommen, der technische Aufwand wäre allerdings enorm. Zum einen bedarf es für aus-



So funktioniert die am Leipziger Institut für Hochfrequenztechnik entwickelte Quasilichtspeicherung: Ein einzelner Puls (Grafik a) setzt sich aus Einzelwellen verschiedener Frequenzen zusammen. In seinem Spektrum (b) ist zu sehen, dass diese Frequenzen kontinuierlich verteilt sind. Eine Folge identischer Pulse (c) besitzt hingegen ein Spektrum aus diskreten Freqenzen, die durch identische Abstände voneinander getrennt sind (d). Das bedeutet im Umkehrschluss: Entnimmt man einem Puls einzelne Frequenzbereiche, erzeugt man eine Folge zahlreicher identischer Kopien. Eine dieser Kopien des Ursprungspulses wählt man nun aus. Je weiter hinten sie auf der Zeitachse liegt, desto größer ist die erreichte Verzögerung. In Grafik c ist ein Beispiel angedeutet: Die Auswahl von Puls n – 3 statt von Puls n entspricht einer zeitlichen Verzögerung von drei Pulsbreiten.

reichende Verzögerungen sehr langer Medien – meist Glasfasern mit einer Länge von mehreren Dutzend Kilometern. Zum anderen wird das Signal dabei stark verzerrt, und die Techniken zu seiner Wiederherstellung stoßen an die Grenzen des heute Möglichen.

Vor Kurzem erzielten wir sowohl an der EPFL als auch am IfH aber weitere Fortschritte bei der optischen Verzögerung beziehungsweise Speicherung. Das System der EPFL arbeitet nach dem Prinzip einer konventionellen Verzögerungsstrecke: Der optische Puls wird einfach an einem verschiebbaren Spiegel reflektiert. Die Verzögerung ist dabei stufenlos von null bis zu der Zeit einstellbar, die der Puls zum Spiegel und zurück benötigt, wenn sich Letzterer am Ende der Verschiebungsstrecke befindet. Den Spiegel selbst erzeugen wir im Inneren der Glasfaser, die der Puls durchläuft, indem wir von den Enden zwei Lichtwellen in entgegengesetzter Richtung in die Glasfaser einstrahlen. Dadurch entsteht in der Faser ein Reflexionsgitter, an dem der Puls reflektiert wird. Mit diesem System konnten wir bei einer Faserlänge von gerade einmal 120 Metern einen Puls mit einer Dauer von 600 Pikosekunden ohne nennenswerte Verzerrungen um mehr als eine Mikrosekunde und damit um rund 1700 Bit verzögern.

Lange Speicherzeiten dank Pulskopien

Am Institut für Hochfrequenztechnik entwickelten wir unterdessen das Verfahren der Quasilichtspeicherung (QLS). Jeder Lichtpuls lässt sich wie in der Grafik auf S. 55 darstellen: Die Frequenzen, aus denen er sich zusammensetzt, sind kontinuierlich unter einer Einhüllenden verteilt. Handelt es sich hingegen um einen periodisch wiederkehrenden Puls, bleibt die Einhüllende dieselbe, das Spektrum ist jedoch diskret. Es enthält jetzt also nur noch einzelne Frequenzen mit einem festen Abstand zueinander. Dabei entspricht der Abstand zwischen den Frequenzen dem Kehrwert des Zeitabstands zwischen den Pulsen – ein Zusammenhang, der sogar für ganze Datenpakete aus vielen Pulsen gilt.

Die Idee hinter dem System des IfH besteht nun einfach darin, aus dem kontinuierlichen Spektrum des ankommenden Datenpakets einzelne äquidistante Frequenzen zu entnehmen. Diese setzen sich daraufhin zu einem Paket zusammen, das stetig wiederkehrt. Anders gesagt: Von dem Paket liegen nun etliche Kopien vor, die einander in bestimmten zeitlichen Abständen folgen. Die gewünschte Speicherzeit lässt sich grob dadurch justieren, dass man spätere oder frühere Pakete herausgreift. Indem wir den Abstand zwischen den entnommenen Frequenzen verändern, lässt sie sich fein einstellen. Dabei treten, solange man bestimmte Bedingungen einhält, nicht einmal Verzerrungen auf.

Derzeit erreichen wir am IfH eine Speicherzeit von bis zu 120 Nanosekunden. So konnten wir Datenpakete mit einer Länge von acht Bit bei einer Datenrate von einem Gigabit pro Sekunde um 120 Bit verzögern. Da die Methode unabhängig von der Datenrate ist, ergibt sich für ein Signal bei einer Datenrate von 40 Gigabit pro Sekunde eine Speicherzeit von 4800 Bit, für ein Signal bei 100 Gigabit pro Sekunde eine von 12 000 Bit und so weiter. Das reicht für Anwendungen bereits aus. Gemeinsam mit Kollegen von der Technischen Universität Berlin haben wir mittlerweile Siliziumchips entwickelt, die genau dieses Verfahren beherrschen. Damit ist die Massenproduktion preiswerter und kompakter optischer Speicher in Reichweite.

Das langsame Licht mag die ursprünglichen Erwartungen nicht ganz erfüllt haben. Doch es hat den Wissenschaftlern die Augen dafür geöffnet, dass sich bei der Ausbreitung optischer Signale auch die Variable Zeit kontrollieren lässt. So erschlossen sie in wenigen Jahren völlig neue Forschungsgebiete. Die optischen Systeme mit höherer Leistung und geringerem Energieverbrauch, die nun möglich geworden sind, werden Antworten auf manche Herausforderung der Zukunft geben.

Doch das ist nicht alles. Inspiriert vom langsamen Licht entwickelten die Forscher völlig neue Methoden, um optische Signale zeitlich zu kontrollieren. Mit ihrer Hilfe könnten wir die Datenraten in unseren Kommunikationssystemen künftig möglicherweise drastisch erhöhen.

DIE AUTOREN

Luc Thévenaz (links) forscht seit 1988 an der École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Dort leitet er derzeit die Arbeitsgruppe Faseroptik. Die Forschungsinteressen des Physikers umfassen faseroptische Sensoren, die nichtlineare Optik in Fasern, langsames und schnelles Licht und die Laserspektroskopie in Gasen. Einladungen zu Forschungsaufenthalten führten ihn an die Stanford University, USA, nach Südkorea und nach Australien. Er gründete die Firma Omnisens im schweizerischen Morges. **Thomas Schneider** ist seit 2000 Professor an der Hochschule für Telekommunikation Leipzig (HfT) und leitet das dortige Institut für Hochfrequenztechnik. Seine Forschungsinteressen liegen auf nichtlinearen optischen Effekten in Wellenleitern und Festkörpern, der ultrahochauflösenden Spektroskopie, der Speicherung und Verlangsamung von Licht sowie der Erzeugung und Nutzung von Wellen im Terahertzbereich für die Kommunikation.

QUELLEN

Bigelow, M. S. et al.: Superluminal and Slow Light Propagation in a Room-Temperature Solid. In: Science 301, S. 200–202, 2003

González-Herráez, M. et al.: Optically Controlled Slow and Fast Light in Optical Fibers Using Stimulated Brillouin Scattering. In: Applied Physics Letters 87, S. 081113, 2005

Jamshidi, K. et al.: A Review to the All-Optical Quasi-Light Storage. In: IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 99, S. 1–7, 2011

Schneider, T. et al.: Quasi-Light Storage: A Method for the Tunable Storage of Optical Packets With a Potential Delay-Bandwidth Product of Several Thousand Bits. In: Journal of Lightwave Technology 28, S. 2586–2592, 2010

Thévenaz, L.: Slow and Fast Light in Optical Fibres. In: Nature Photonics 2, S. 474–481, 2008

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1135751**

WISSENSCHAFTSTHEORIE

Die Physik – ein baufälliger Turm von Babel

Physiker versprechen immer wieder, ein Theoriegebäude zu errichten, das die gesamte Welt erklärt. Dabei müsste jeder wissen, der die Disziplin zu seinem Beruf gemacht hat, dass sogar in längst errichteten Stockwerken teils gewaltige Risse klaffen.

Von Tony Rothman

»Ich will wissen, warum die Dinge sind, wie sie sind. Und ich will die fundamentalen Gesetze verstehen, die unser Universum zu dem machen, was es ist.« So oder ähnlich würden wohl viele angehende Physiker erklären, was sie bewegt, diese Wissenschaftsdisziplin zu ihrem Beruf zu machen. Wir Physiker wollen schlicht und einfach lernen, wie die Welt funktioniert.

Physik ist die fundamentalste der Naturwissenschaften – so sehen es die Physiker selbst, und diese Sichtweise prägt auch die Art und Weise, wie Physik gelehrt wird. Demzufolge ist das gedankliche Gebäude der Naturbeschreibung, das die Disziplin zu errichten versucht, allumfassend, frei von inneren Widersprüchen, konzeptionell zwingend und über all das hinaus auch noch überwältigend schön. Das Feld der von der Physik erklärbaren und erklärten Phänomene ist weit, und es bildet nichts weniger als die Grundlage der gesamten modernen Zivilisation.

Doch in dem Gebäude zeigen sich Risse. Je weiter ein Physiker auf seinem Berufsweg voranschreitet, als desto auffälliger wird er sie empfinden. Er wird den Schmutz entdecken, der unter den Teppich gekehrt worden ist, und all die Schummeleien und Betrügereien, die auch der Physik nicht fremd sind. Das vermeintlich stabile Bauwerk, so stellt er beunruhigt fest, sieht eher aus wie eine moderne Version von Pieter Bruegels Turm zu Babel – eine heruntergekommene Struktur aus isolierten Modellen, die durch schiefe Erklärungen notdürftig miteinander verbunden sind, kurz eine Monstrosität, die himmelwärts taumelt.

PIETER BRUEGEL DER ÄLTERE: TURMBAU ZU BABEL, 1563 / PUBLIC DOMAIN

Als sie mit dem Bau des Turms von Babel den Himmel zu erreichen trachteten, zogen die Menschen den Zorn Gottes auf sich. Er strafte sie, indem er ihre Sprache verwirrte, so dass sie sich nicht mehr miteinander verständigen konnten, das Vorhaben aufgaben und sich in alle Welt verstreuten. Die Physiker der Gegenwart bauen hingegen weiter an ihrem Weltgebäude – und tun, als würden sie die Risse und notdürftig miteinander verbundenen Strukturen in den unteren Etagen nicht bemerken. Abgebildet ist »Der Turmbau zu Babel« von Pieter Bruegel dem Älteren aus dem Jahr 1563.

Uns allen ist klar, dass noch immer viele grundlegende Fragen unbeantwortet sind. Welcher physikalische Mechanismus steckt hinter der Trägheit der Masse? Besitzt der Raum mehr als drei Dimensionen? Existiert eine Theorie von allem, die die Grundkräfte der Natur in einem gemeinsamen Rahmen beschreibt? Doch schon weit diesseits der Forschungsfront, auf dem Niveau von Vordiplom und Bachelorarbeit, klaffen große Lücken oder gar Abgründe.

Das hindert die Lehrenden allerdings nicht daran, die Themen als vollständig verstanden zu präsentieren. Denn auch sie fürchten die Gefahren, die darin lauern. Diese Vorgehensweise ist intellektuell unredlich und untergräbt genau jene Tugenden, die unabdingbar zur Wissenschaft gehören, nämlich die Dinge zu hinterfragen und Antworten mit einem angemessenen Grad an Skepsis zu betrachten.

In jeder Anfängervorlesung über Physik müssen sich die Studenten schon in den ersten Wochen mit dem Phänomen der Reibung auseinandersetzen. Sie lernen, dass Reibung die Bewegung von Objekten hemmt und durch die mikroskopische Wechselwirkung zweier aneinander entlanggleitender Oberflächen zu Stande kommt. Diese Erklärung erscheint ihnen ziemlich plausibel, ja sogar offensichtlich. Doch unabhängig von den Modellen, die man ihnen präsentiert und die hochtrabend von molekularen Bergen sprechen, die sich gegenseitig den Weg versperren, oder von Laufschuhen, die an der Bahn kleben, erzeugt Reibung Wärme und damit eine Zunahme von Entropie. Damit schafft sie aber auch einen Unterschied zwischen Vergangenheit und Zukunft.

Die zwangsläufige Zunahme der Entropie bei irreversiblen Prozessen, der zweite Hauptsatz der Thermodynamik, ist das einzige Naturgesetz, das diese grundlegende Unterscheidung trifft. Hingegen sind die newtonschen Gesetze, die Gesetze der Elektrodynamik und die der Relativität alle reversibel – für keines spielt es eine Rolle, ob die Uhr des Universums vorwärts- oder rückwärtsläuft. Doch wenn die newtonschen Gesetze tatsächlich das Fundament bilden, dann sollte sich der zweite Hauptsatz der Thermodynamik aus der newtonschen Mechanik herleiten lassen. Das ist aber niemals befriedigend gelungen. Die Unvereinbarkeit des zweiten Hauptsatzes mit den anderen grundlegenden Theorien der Physik bleibt das vielleicht größte Paradoxon der gesamten Disziplin. In den Anfängerkursen lassen es die Dozenten jedoch einfach aus, und die Autoren der Lehrbücher widmen ihm kein einziges Wort.

AUF EINEN BLICK

RISSE IM WELTGEBÄUDE

1 Die Physik ist bei der Beschreibung der Natur weiter vorangekommen als andere Disziplinen. Allzu selbstgewiss darf sie dennoch nicht sein. Selbst auf altbekannten Forschungsgebieten hat sie manche **fundamentale Frage** unbeantwortet gelassen.

2 Schon auf dem Niveau von Bachelorstudium und Vordiplom begegnen angehenden Physikern **unendlich große Kräfte**, **unlösbare Gleichungen** und die **Paradoxien der Quantenwelt**.

3 Auch wenn mancher von der **Weltformel** träumt, liegen auf vielen Gebieten endgültige Antworten noch außer Reichweite. Die Physik bleibt vorerst eine Sammlung theoretischer Modelle und kann nicht den Anspruch erheben, die »Wahrheit« gefunden zu haben.

Der große Schwindel der Einführungsvorlesungen

Und es gibt weitere Probleme. Für einen Physiker besteht die Welt aus Billardkugeln und Schraubenfedern. Eine ideale Feder beispielsweise schwingt bis in alle Ewigkeit. Jeder, der schon einmal eine reale Feder beobachtet hat, weiß indessen, dass diese Ewigkeit in Wirklichkeit nur einige Sekunden andauert. Mathematisch ist das kein Problem: Wir führen einfach einen Reibungsterm in die Federgleichung ein und bringen auf diese Weise Theorie und Beobachtung in Übereinstimmung. Doch der Term wird ad hoc eingeführt, von Hand justiert und nicht näher begründet, quasi aus dem Ärmel geschüttelt. Erklärt er auf irgendeine Weise das Verhalten von Federn? Nicht im Geringsten.

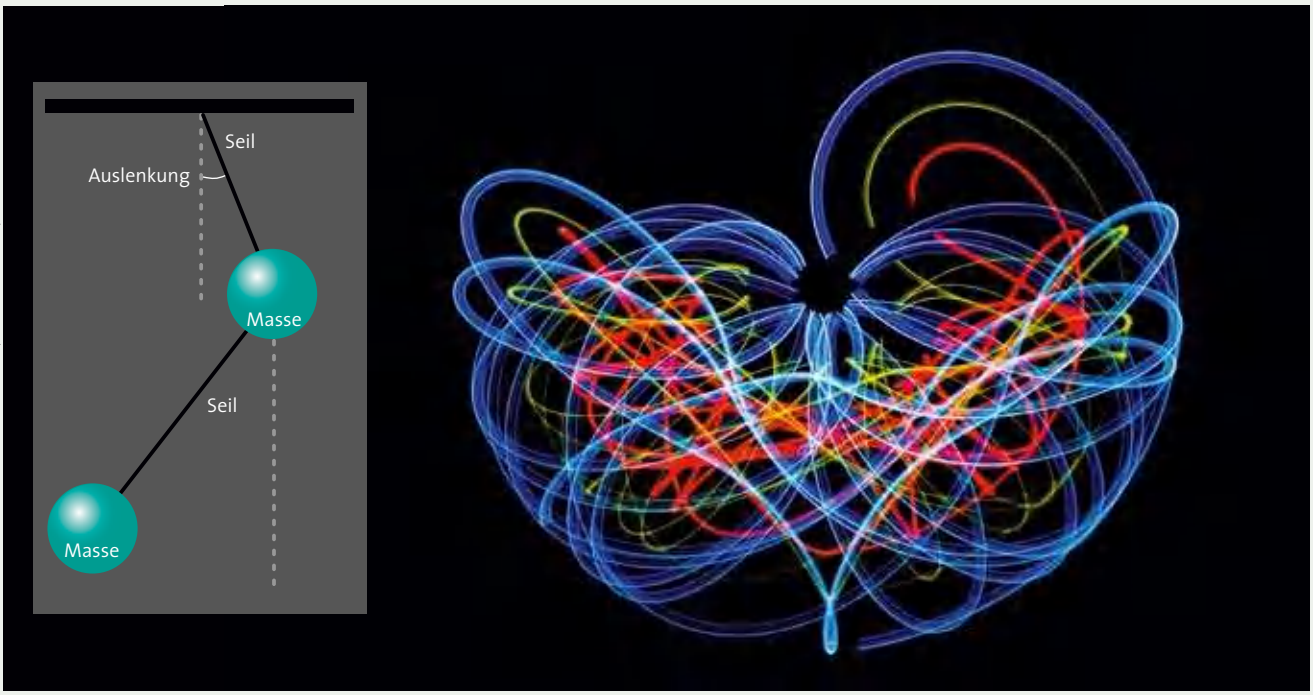
Vielleicht hat unsere Selbstgefälligkeit einfach damit zu tun, dass wir eine plausible Gleichung zu Papier gebracht haben. Tatsächlich glaubten die Physiker lange, die Mathematik sei der Stein von Rosette zur Entschlüsselung der Geheimnisse der Natur. Seit der ungarisch-amerikanische Nobelpreisträger Eugene Wigner (1902–1995) im Jahr 1960 sein berühmtes Essay »The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences« (etwa: »Die unbegreifliche Effizienz der Mathematik in den Naturwissenschaften«) veröffentlicht hat, ist diese Ansicht regelrecht zu einem Glaubenssatz geworden.

Doch der Glaube, dass Gott ein Mathematiker ist, dürfte eher das Ergebnis selektiver Wahrnehmung sein. Der große Schwindel der physikalischen Anfängerkurse besteht ja gerade in der Behauptung, dass jedes Problem eine exakte Lösung besäße. Mehr noch: Man erwartet von den Studierenden sogar, dass sie diese Lösung finden, und impft sie dadurch regelrecht mit einer Erwartungshaltung, die kaum etwas mit der Realität zu tun hat. Denn nur verschwindend wenige physikalische Probleme besitzen exakte Lösungen, verglichen mit dem großen Rest. Ein Physiker muss im Verlauf seiner Karriere daher vor allem Näherungslösungen finden – und hoffen, dass sie einigermaßen stimmen.

Unverzichtbarer Bestandteil der ersten Physikvorlesungen ist auch das Pendel. Seine einfachste Variante besteht gerade einmal aus einer Masse, die am Ende eines Fadens hin- und herschwingt. Wendet man die newtonschen Gesetze auf das Pendel an, gelangt man zu einer Gleichung, die sich nur sehr schwer lösen lässt. Wir sagen den Studierenden daher, sie sollen davon ausgehen, dass das Pendel nur kleine Oszillationen ausführt. Mit dieser Vereinfachung lässt sich die Aufgabe leicht erledigen.

Tatsächlich ist das ursprüngliche Problem aber nicht nur für Anfänger zu schwierig. Es besitzt gar keine exakte Lösung, jedenfalls nicht in Form »elementarer Funktionen« wie Sinus und Kosinus. In Lehrbüchern für Fortgeschrittene

FOTO MIT FRDL. GEN. VON MICHAEL G. DEVEREUX UND ELLEN MURPHY, UNIVERSITY OF LIMERICK; GRAFIK LINKS: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



Hängt man an die Kugel eines Pendels ein weiteres Pendel (kleines Bild), erweist sich der zeitliche Verlauf der Bewegungen als chaotisch: Schon kleinste Änderungen der Anfangsbedingungen führen zu unvorhersehbaren Ergebnissen. Diese lassen sich leicht veranschaulichen. Befestigt man Leuchtdioden an den Kugeln eines solchen Doppelpendels (rechts, Langzeitaufnahme), entstehen faszinierende Bilder.

heißt es zwar, es gäbe doch eine. Indessen kann man lange darüber diskutieren, ob das Wort »exakt« für diese Ungeheuer von mathematischen Termen wirklich zutrifft. Spätestens wenn man den Faden durch eine Feder ersetzt, vergeht Physikern die Freude an dem Problem gänzlich.

Es führt kein Weg daran vorbei, dass wir die reale Welt von ihrer mathematischen Beschreibung unterscheiden müssen. Einstein drückte das im Widerspruch zu Wigner so aus: »Insofern sich die Sätze der Mathematik auf die Wirklichkeit beziehen, sind sie nicht sicher, und insofern sie sicher sind, beziehen sie sich nicht auf die Wirklichkeit.«

Unendlich große Kräfte gibt es nicht – zumindest hoffen wir das

Diese Maxime sollten sich Dozenten vielleicht zu Herzen nehmen, wenn sie mit ihren Studierenden dann auch über das berühmte newtonsche Gravitationsgesetz sprechen. Eine seltsame Eigenheit bleibt nämlich oft unerwähnt. Gemäß der Gleichung wird die Anziehungskraft zwischen zwei Körpern unendlich groß, wenn sie sich unendlich nahe kommen. Unendlich große Kräfte kommen in der Natur jedoch nicht vor – zumindest hoffen wir das –, weshalb wir diese unerwünschte Singularität mit dem Argument beseitigen, dass reale Objekte eine endliche Größe besitzen. Dann können sich ihre Mittelpunkte einander nie so stark annähern, dass es zu einem Problem käme.

In der Einführungsvorlesung zum Elektromagnetismus lernen die Studenten jedoch auch das coulombsche Gesetz kennen. Es beschreibt die Anziehung zwischen elektrischen Ladungen, und seine Form ist identisch mit der des newtonschen Gesetzes. In der modernen Physik, in der viel von punktförmigen Teilchen wie Elektronen und Positronen die Rede ist, müssen wir uns nun aber wirklich Sorgen über unendliche Kräfte machen. Und es war genau diese Schwierigkeit, die zu den modernen Feldtheorien wie der Quantenelektrodynamik führte.

Vorlesungen über Elektrizität und Magnetismus bergen weitere Mysterien. Einer der Höhepunkte einer Anfängerveranstaltung, zumindest für uns Professoren, ist die Einführung der Maxwell-Gleichungen, in denen diese Phänomene zum Elektromagnetismus vereinigt werden. Einige Vorlesungen später erklären wir den Studenten, dass Licht aus elektrischen und magnetischen Feldern besteht, die senkrecht zueinander schwingen und sich durch den Raum ausbreiten. Und als Nächstes behaupten wir, dass Licht Druck auf Materie ausübt. Dieser Strahlungsdruck ermöglicht beispielsweise die Detonation einer Wasserstoffbombe, erlaubt aber auch, Raumsonden durch Sonnensegel anzutreiben.

Einführende Lehrbücher erklären den Strahlungsdruck üblicherweise so, dass das elektrische Feld einer Lichtwelle Elektronen in eine Richtung beschleunigt und das magnetische Feld sie dann weiter vorantreibt. Diese Erklärung, die sich manchmal noch in der fünften Auflage eines Lehrbuchs findet, ist aber völlig falsch. Will man das Phänomen korrekt erklären, muss man stattdessen auf eine berühmte Ad-hoc-Idee zurückgreifen, nämlich auf das Abraham-Lorentz-Modell.

Beschrieben mit den Mitteln der klassischen Physik liefert das Modell allerdings paradoxe Ergebnisse. Der Versuch, es auf eine solide Grundlage zu stellen, führte wiederum zur Entwicklung der Quantenelektrodynamik. In dieser schließlich finden sich an jeder Ecke Unendlichkeiten, mit denen kein Physiker irgendetwas anfangen kann. Will man sie beseitigen, benötigt man eine weitere Ad-hoc-Prozedur, die so genannte Renormierung. Paul Dirac empfand sie als so abstoßend, dass er die Physik gleich komplett an den Nagel hängte. Zwar hat sich die Theorie seither weiterentwickelt, doch viele Physiker würden wohl Richard Feynman zustimmen, der die Renormierung – als einer ihrer Erfinder – schlicht als Hokuspokus bezeichnete. Hat die Physik also tatsächlich ein adäquates Fundament für all die Weisheit zu bieten, die in Anfängervorlesungen so unbekümmert ausgebreitet wird?

Einer der großen Augenblicke im Leben eines jeden jungen Physikers ist die erste Begegnung mit dem Lagrange-Formalismus. In ihm enthüllt Gott die Wahrheit über die Welt. Seine Wurzeln liegen im alten Griechenland sowie in der im 17. Jahrhundert von Pierre de Fermat geäußerten Idee, dass Licht zwischen zwei Punkten den Weg wählt, der die geringste Zeit in Anspruch nimmt. Dieses fermatsche Prinzip erlaubt unter anderem, das berühmte snelliussche Gesetz der Lichtbrechung herzuleiten. Die Idee, dass die Natur bestimmte Größen zu minimieren versucht, führte schließlich zum »Prinzip der kleinsten Wirkung«. Es besagt, dass man nur eine Größe namens »Wirkung« minimieren muss, um – Simsalabim – wie durch ein Wunder die newtonsche Gleichung für ein System zu erhalten. (In klassischen Systemen ist die Wirkung im Wesentlichen definiert als die kinetische Energie minus der potenziellen Energie, was als Lagrange-Funktion bezeichnet wird, multipliziert mit der Zeit. Mit der umgangssprachlichen Bedeutung von Wirkung hat der Begriff nichts zu tun.)

Man muss nur eine Größe namens »Wirkung« minimieren, um – Simsalabim – wie durch ein Wunder die newtonsche Gleichung zu erhalten

Man weiß oft nicht einmal, ob die Lösung korrekt ist

Die Erkenntnis, dass die newtonschen Gesetze aus dem Prinzip der kleinsten Wirkung folgen, ist Ehrfurcht erregend. Junge Physiker lassen sich sofort davon überzeugen, dass die Wirkung – in logischer Hinsicht, wenn auch nicht in historischer – den newtonschen Gesetzen vorausgeht. Wenn sie sich an die Anfängerübung erinnern, in der sie für ärgerlich komplizierte Systeme aus Seilen und Hebeln die newtonschen Gleichungen formulieren sollten, dann erscheint ihnen dieselbe Übung im Lagrange-Formalismus nun erstaunlich einfach.

Der große Schwindel der Einführungsvorlesungen besteht aber weiterhin in der Unterstellung, dass Probleme exakte Lösungen besitzen. In meinem zweiten Studienjahr sollten wir die Gleichungen für ein Doppelpendel herleiten – für ein Pendel also, das an einem zweiten Pendel aufgehängt ist (siehe Bild S. 63). Mit dem Lagrange-Formalismus hat man diese Aufgabe schnell erledigt. Was uns damals allerdings nicht gesagt wurde oder vielleicht auch noch gar nicht bekannt war: Das Doppelpendel ist ein chaotisches System. Es ist daher prinzipiell unmöglich, die hergeleiteten Gleichungen auch zu lösen. Was also haben wir bei dieser Aufgabe eigentlich gelernt?

Nichtsdestoweniger funktioniert der Formalismus sehr gut, wenn man ihn auf Standardsysteme anwendet. In solchen Systemen sind die Hebel durch ideale Seile verbunden, die sich nicht dehnen. Unglücklicherweise ist die Lagrange-Methode aber alles andere als simpel, wenn sich die Länge der Seile mit der Zeit verändert. Dann werden die nötigen Korrekturterme so aufwändig, dass sich nahezu jeder Lehrbuchautor erhebliche Fehler leistet – oder diese Szenarien gleich vollständig weglässt. Tatsächlich ist die Situation dermaßen heikel, dass man häufig nicht einmal weiß, ob die gefundene Lösung korrekt ist.

Dies ist keineswegs ein rein akademisches Problem. Einstein betrachtete seine Theorie der Gravitation, die allgemeine Relativitätstheorie, als unvollständig, solange er seine Feldgleichungen nicht aus einer Wirkung herleiten konnte (eine Leistung, die der Mathematiker David Hilbert schließlich fünf Tage vor ihm vollbrachte).

Aus der Relativitätstheorie lassen sich zahlreiche Modelle des Kosmos ableiten, von denen die meisten allerdings in keiner Weise dem realen Universum ähneln. Wie wir aber heute wissen, erhält man für einige dieser Modelle ein falsches Ergebnis, wenn man die zugehörigen Feldgleichungen aus einer Wirkung herleitet. Warum das Verfahren dort versagt und wie es sich korrigieren lässt, ist Gegenstand einer beachtlichen Zahl eher esoterischer Forschungsarbeiten. Soweit ich weiß, erfordern all diese Korrekturen jedoch eine Kenntnis der korrekten Antwort, also der einsteinschen Feldgleichungen.

Moderne Physiker nehmen den Vorrang der Lagrange-Mechanik ernst. Zeitgenössische Praktiker, ob Kosmologen oder Stringtheoretiker, beginnen unvermeidlich damit, für ihre Lieblingstheorie eine Wirkung zu postulieren, aus der sie dann die Gleichungen herleiten. Doch wie können sie sicher sein, die korrekte Lösung gefunden zu haben, wenn sie nicht bereits einen Satz akzeptierter Feldgleichungen besitzen? Diese Frage stellt sich insbesondere dann, wenn sich die Theorie weit von den Experimenten entfernt hat, wie es heute der Fall ist.

Es wäre wenig überraschend, wenn nicht auch die Welt der subatomaren Teilchen und die Quantenphysik Mysterien hervorbringen würde. Und tatsächlich werden wir nicht enttäuscht. So enthält beispielsweise das Standardmodell der Teilchenphysik nicht weniger als 19 frei justierbare Parameter. Das ist eine ganze Menge. »Mit vier Parametern kann ich

einen Elefanten anpassen!«, soll John von Neumann gesagt haben. An dieser Stelle könnte man auch erwähnen, dass »Schönheit« nicht gerade zu den bevorzugten Begriffen gehört, wenn man über das Standardmodell spricht.

Doch so weit muss man in der Quantenphysik gar nicht gehen, wenn man sich verwirren lassen will. Das Konzept des Spins eines Elektrons spielt in jeder Einführungsvorlesung über Quantenmechanik eine grundlegende Rolle. Spin ist der Fachausdruck für den Eigendrehimpuls des Teilchens. Doch was genau sich hier dreht, wird nie zum Thema gemacht. Einer der Erfinder dieses Konzepts, Wolfgang Pauli, hatte es zunächst sogar wieder verworfen. Denn wenn das Elektron einen endlichen Radius besitzt, worauf einige Experimente hindeuteten, dann müsste es an seiner Peripherie mit Überlichtgeschwindigkeit rotieren. Betrachten wir es hingegen als punktförmig, müssen wir uns ein rotierendes Teilchen mit Radius null vorstellen. Keine leichte Aufgabe, ganz abgesehen von dem Ärger, den uns die damit einhergehenden unendlichen Kräfte bereiten.

Schwierigkeiten unter den Teppich kehren

Für gewöhnlich ignorieren Lehrbücher der Quantentheorie selbst jene Schwierigkeiten, die mitten im Zentrum der Disziplin lauern. Die grundlegendste von ihnen ist das berüchtigte Messproblem. Die Schrödinger-Gleichung, die das Verhalten von Quantensystemen beschreibt, ist ebenso deterministisch wie die newtonsche Gravitation. Doch die Quantenmechanik sagt nur die Wahrscheinlichkeit voraus, mit der ein Experiment ein bestimmtes Ergebnis liefert. Wie ein deterministisches System, in dem das Ergebnis vorherbestimmt ist, just im Augenblick der Messung abrupt zu einem probabilistischen werden kann, ist das große ungelöste Mysterium der Quantentheorie. Doch keines der vielen mir bekannten Lehrbücher über Quantenmechanik erwähnt dieses Problem überhaupt. Ein weit verbreitetes unter ihnen treibt die Ironie gar auf die Spitze: Es enthält ein Kapitel »Messungen«, ohne darin das Messproblem zu behandeln.

Gerade die Verfasser von Lehrbüchern über Quantenmechanik sind geschickt darin, konzeptionelle Schwierigkeiten unter den Teppich zu kehren. Vielleicht hängt dies mit ihrem Thema zusammen, das dem gesunden Menschenverstand so sehr widerspricht. Beim berühmten Doppelspalt-Versuch wird dies besonders deutlich. Das Experiment dient im Allgemeinen dazu, den Welle-Teilchen-Dualismus des Lichts zu illustrieren, und konfrontiert uns direkt mit der Unergründlichkeit der Natur.

Im Grunde ist es ganz einfach: Man lässt einen Lichtstrahl durch ein Paar schmaler Schlitze auf einen Schirm fallen, beobachtet, was passiert, und stellt fest, dass sich Licht einerseits wie eine Welle, andererseits wie ein Teilchen verhalten kann, aber nicht beides gleichzeitig. Dieses große Paradoxon soll uns hier aber nicht interessieren, sondern vielmehr die Tatsache, dass bei der Erklärung des Experiments in Lehrbüchern üblicherweise sowohl klassische Lichtwellen als auch Lichtteilchen – Photonen – eine Rolle spielen. Gewöhnlich kapitulieren die Autoren nämlich bei der Analyse des Experiments. Unweigerlich fangen sie an, über die Intensität des einfallenden Lichts zu schreiben, die ein Maß für die Stärke der elektrischen und magnetischen Felder ist. Dann – nach einem völlig unlogischen Gedankensprung – schreiben sie plötzlich über Photonen und tun so, als besäßen diese quantenmechanischen Objekte elektrische und magnetische Felder. Das ist aber nicht der Fall. Will man das berühmte Experiment tatsächlich akkurat beschreiben, ist ein so genannter kohärenter Zustand erforderlich. Näher als mit dieser raffinierten quantenmechanischen Konstruktion kann man der Beschreibung einer klassischen Lichtwelle nicht kommen.

Tatsächlich verzichten die Lehrbuchautoren sogar völlig auf eine Erklärung des Experiments. »Erklärung« bedeutet in der Physik im Allgemeinen, einen Mechanismus zu finden, der den beobachteten Vorgang kausal in Gang setzt. Zu einem solchen Mechanismus gehören Kräfte. Statt also zu beschreiben, wie das Licht mit den Spalten wechselwirkt, und damit zu erklären, warum es sich wie beobachtet verhält, sagen sie lediglich, dass die Lichtwelle an den Rändern der beiden Spalte bestimmte Bedingungen erfüllen muss, und lassen die dabei auftretenden Kräfte unter den Tisch fallen. Die Ergebnisse stimmen zwar gut mit den Beobachtungen überein. Doch das in diesem Zusammenhang am häufigsten benutzte Verfahren vermeidet nicht nur den Kern des Problems, sondern ist auch noch mathematisch inkonsistent. Ganz zu schweigen davon, dass sich hier ebenfalls in vollem Ausmaß das Messproblem stellt.

Solche Beispiele gibt es in der Physik zuhauf. Statt so zu tun, als ob es sie nicht gäbe, sollten Physiker daher ehrlich bleiben und es gegenüber ihren Studierenden zugeben, wenn sie mit ihren Erklärungen die Abgründe vermeiden. Noch gegen Ende des 20. Jahrhunderts galt Physik als empfangene Wahrheit – in ihr enthüllte Gott sein Antlitz. Einige Physiker mögen diese Vorstellung weiterhin bewahren. Ich selbst sehe die Physik lieber als eine Sammlung von theoretischen Modellen. Sie beschreiben die Landschaft, sind aber nie die Landschaft selbst. Endgültige Antworten liegen darum schlicht außerhalb unserer Reichweite. Sicher sind die Physiker bei der Beschreibung der Natur weiter vorangekommen als die Vertreter anderer Wissenschaften. Mit Verständnis sollten sie dies aber nicht verwechseln. ~

DER AUTOR

Tony Rothman ist theoretischer Physiker an der Princeton University. Sein Forschungsinteresse gilt dem frühen Universum, der allgemeinen Relativitätstheorie und fundamentalen Fragen der Physik.

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1124688**

Kunst in der Physik

Es braucht nicht viel, damit eine glatte Flüssigkeitsoberfläche schöne Muster hervorbringt.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

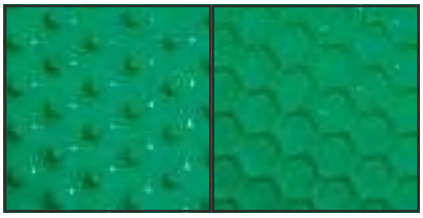
... dass trotz der Flüssigkeit in der Substanz
eine Solidität in der Form erreicht wird.

Italo Calvino (1923–1985)

Ein stiller Bergsee zeigt es ganz anschaulich: Lässt man Flüssigkeiten in Ruhe, zeichnen sie sich durch ebene, spiegelnd glatte Oberflächen aus. Doch schon kleinste mechanische Einwirkungen – wie etwa Luft, die darüber streicht – können sie kräuseln oder Wellen entstehen lassen. Dabei kommt es keineswegs nur zu einem ungeordneten Durcheinander. Vielmehr kann man die Oberflächen zur Ausbildung erstaunlich vielfältiger Muster anregen.

Die einfachste Möglichkeit, dies systematisch und reproduzierbar zu tun, besteht darin, eine Flüssigkeit in Schwingung zu versetzen. Besorgen wir uns also eine ebene Platte, richten sie horizontal aus und überziehen sie mit einer Flüssigkeitsschicht. Dann bedarf es nur noch eines Lautsprechers, dessen Amplitude und Frequenz sich regeln lassen, und die Experimente können beginnen. Auf diese Weise sind die Oberflächenstrukturen auf den hier gezeigten Fotos entstanden.

Je nach Dichte, Oberflächenspannung und Viskosität der Flüssigkeit, außerdem abhängig von Frequenz und Amplitude der Anregung, entstehen dabei ganz unterschiedliche Muster. Startet man mit fester Tonhöhe (Frequenz) und kleiner Lautstärke (Amplitude), so bleibt die Flüssigkeitsoberfläche zunächst glatt und eben. Sie wird erst ab einem kritischen Wert der Amplitude instabil und bildet dann eine charakteristische Struktur aus. Diese kann aus einfachen Formen wie etwa Linien, Quadraten, Dreiecken, Sechsecken oder Spiralen bestehen, aber auch aus komplexen Mustern. Interessant ist dabei nicht nur, dass sich überhaupt derartige Strukturen bilden. Der Physiker staunt vor allem auch darüber, dass das System die Schwingungsenergie derart kreativ umsetzen kann. Schließlich wird sie ihm relativ unspezifisch in Form einer simplen Auf-und-ab-Bewegung zugeführt.



Während der Aufwärtsbewegung von verdünnter Abtönfarbe bilden sich Wellenberge (links). In der Abwärtsbewegung stülpen sie sich um und zeigen hexagonale Strukturen (rechts).

Wie bei einem bremsenden Bus

Hier also die Erklärung: Bewegt sich die schwingende Platte nach oben, beschleunigt sie die Flüssigkeit in dieselbe Richtung. Auf Grund ihrer Trägheit behält diese bei der anschließenden Abwärtsbewegung der Platte ihre Aufwärtsbewegung aber zunächst bei. Das kennt man vom Busfahren. Bremst der Bus plötzlich, müssen stehende Fahrgäste einen Halt suchen, um sich nicht weiter in Fahrtrichtung zu bewegen.

Ein fester Körper würde das Auf und Ab mitmachen, ohne sich zu verformen. Hier ist das anders. Denn eine Flüssigkeitsschicht ist niemals ganz eben, sondern verfügt über dickere und dünnere Bereiche. Erstere steigen auf Grund ihrer größeren Masse und damit größeren Trägheit ein Stück höher als die dünneren Bereiche – so verstärken sich die Unregelmäßigkeiten.

Hat die Platte anschließend den tiefsten Punkt durchlaufen und bewegt sich wieder nach oben, kommt ihr die Flüssigkeit umso heftiger entgegen, je dicker und damit träger die Flüssigkeitsschicht an der jeweiligen Stelle ist. Auf diese Weise stülpen sich die Erhöhungen in Vertiefungen um.

Die Muster werden dem System also nicht von außen aufgeprägt. Vielmehr wachsen sich die Unregelmäßigkeiten in einem Akt der Selbstorganisation zu ausgeprägten Wellenbergen und -tälern aus, die ständig wechselseitig ineinander übergehen. Kurz: Es bildet sich innerhalb weniger Schwingungsperioden ein System stehender Wellen.

Nun wechselt die ganze Flüssigkeitsschicht mit der halben Frequenz der anregenden Schwingung zwischen zwei komplementären Mustern. Je nachdem, wie viele verschiedene stehende Oberflächenwellen entstehen, kommt es dabei zu mehr oder weniger komplexen Überlagerungen. Sind zwei Wellen beispielsweise senkrecht zueinander orientiert, zeigen sich Muster mit quadratischer Symmetrie. Bei drei Wellen, zwischen denen ein Winkel von 60 Grad liegt, entstehen hexagonale Muster.

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de

Die hier gezeigten Experimente als Video auf

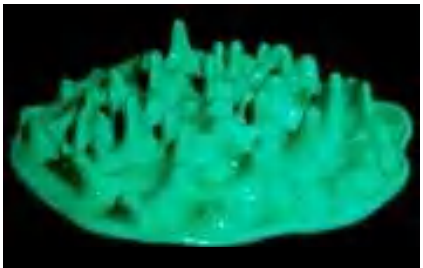
www.spektrum.de/tanzendekleckse

ALLE FOTOS: LAURA JOACHIMMEYER / INSTITUT FÜR DIDAKTIK DER PHYSIK, UNIVERSITÄT MÜNSTER

Versetzt man horizontale Flüssigkeitsschichten in Schwingung, nehmen sie je nach Beschaffenheit sowie Frequenz und Amplitude der anregenden Schwingung komplexe Muster an. Zu sehen sind (von links nach rechts) Muster in verdünnter Abtönfarbe, Kakaopaste, gefärbtem Kleister, Shampoo und nochmals in gefärbtem Kleister.

Die Flüssigkeiten bringen aber nicht nur reguläre Strukturen hervor. Steigert man die Amplitude des Lautsprechers weiter, erreicht man einen zweiten kritischen Punkt. Diesmal bildet sich kein einfaches, eindeutiges Muster mehr heraus, vielmehr wechselt das System von da an völlig unregelmäßig zwischen immer neuen Mustern. Sie verschwinden so schnell wieder, dass ihnen meist nicht einmal die Zeit bleibt, sich vollständig auszubilden. Man spricht von chaotischem Verhalten: Das System reagiert in diesem Bereich empfindlich auf kleinste Störungen und bringt das in einem ständigen irregulären Wechsel der Struktur zum Ausdruck.

Es lohnt sich, mit unterschiedlichen Flüssigkeiten zu experimentieren. Dann findet man unter anderem so genannte lokalisierte Zustände, die durch ihre Form wie ihre Dynamik faszinieren. Zum Beispiel können sich wurmartige Gebilde wie belebt durch den Klecks hindurchwinden (oben rechts). Andere Flüssigkeiten tendieren zu spiral- oder sternförmigen Mustern (oben Mitte). Die Vielfalt der Formen lässt sich durch gezieltes Verdünnen oder veränderte Mischungen noch erhöhen.



Bei diesem Experiment mit verdünnter Abtönfarbe überschritt die Amplitude der anregenden Schwingung einen bestimmten Wert. Dadurch gelangte das System in einen so genannten chaotischen Zustand. Darin wechseln sich ständig verschiedene Muster ab – so schnell, dass sie sich meist nicht vollständig ausprägen können.

Insbesondere wenn man die dynamischen Strukturen live erlebt, kann man sich ihrer ästhetischen Wirkung kaum entziehen. Auf der Grundlage solcher strukturbildender Prozesse konnten Künstler wie Hans Jenny (1904–1972) und Alexander Lauterwasser (* 1951) eindrucksvolle Phänomene hervorbringen. Einer der Ersten, der mit vibrierenden Flüssigkeiten experimentierte und sie physikalisch zu beschreiben versuchte, war indessen Michael Faraday (1791–1861). Damit war er seiner Zeit jedoch so weit voraus, dass seine Arbeiten in Vergessenheit gerieten. Erst in den letzten Jahrzehnten wurden sie wiederentdeckt und im Rahmen der nichtlinearen Physik weiterentwickelt.

Heute beschreibt man die schwingenden Flüssigkeitsschichten nach Ilya Prigogine (1917– 2003), dem Träger des Chemienobelpreises 1977, als so genannte dissipative Strukturen (vergleiche SdW 12/2011, S. 40, über Kerzenflammen). Durch Dissipation von Energie, also Umwandlung von Bewegungsenergie in Wärme, vermögen sie einen stationären Zustand fernab des thermodynamischen Gleichgewichts aufrechtzuerhalten und die dabei angenommenen Formen gegen äußere Störungen zu stabilisieren. Nichtlineare Prozesse spielen dabei eine wichtige Rolle.

Die charakteristischen Formen der Systeme, in unserem Fall die Flüssigkeitsmuster, sind jedoch nur Ausdruck meist unsichtbarer zyklischer Bewegungen von Flüssigkeitsportionen. Sowie die Bewegung zum Erliegen kommt, verschwindet die Form. In dieser Feststellung kann man ein sehr allgemeines Prinzip sehen, das noch über dissipative Systeme hinausgeht. Der Dichter Luigi Pirandello (1867–1936) hat es so umschrieben: »Das Sein muss sich in einer Form verfangen, eine Zeit lang in ihr erscheinen, hier oder dort, so oder so. Jedes Ding ist, solange es dauert, zu seiner Form verurteilt, dazu, so zu sein, wie es ist, nicht mehr anders sein zu können.« ~

DER AUTOR

H. Joachim Schlichting war bis 2011 Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. 2008 erhielt er für seine didaktischen Konzepte den Pohl-Preis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.

QUELLEN

Faraday, M.: On Forms and States Assumed by Fluids in Contact with Vibrating Elastic Surfaces. In: Philosophical Transactions of the Royal Society 121, S. 319–340, 1831

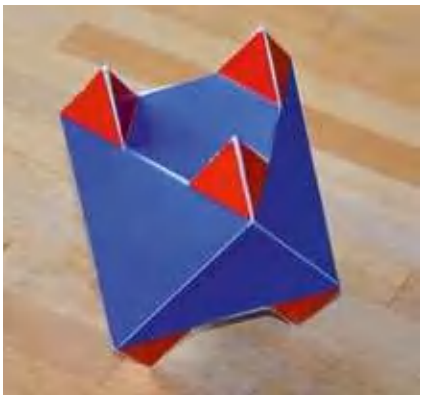
Pirandello, L.: Mattia Pascal / Einer, keiner, hunderttausend. Coron, Zürich o. J., S. 332

LITERATURTIPP

Ucke, C., Schlichting, H.J.: Spiel, Physik und Spaß. Physik zum Mitdenken und Nachmachen. Wiley-VCH, Weinheim 2011
Zwei Experten für Physikspielzeug laden zum Mitmachen ein.

GEOMETRIE

Kollektive Verklemmung und das gehörnte Oktaeder



FOTOS DIESER DOPPELSEITE: MIT FRDL. GEN. VON ELFRIEDE WOHLGEMUTH

Untersuchungen von Materialforschern ergeben unversehens neue Raumfüllungen durch regelmäßige Körper.

VON CHRISTOPH PÖPPE

Meine Kaffeevorratsdose fasst angeblich 250 Gramm. Aber wenn ich den Inhalt einer frisch eingekauften 250-Gramm-Vakuumpackung hineinschütte, ragt der Berg über den oberen Rand der Dose hinaus. Kein Problem: Ich stoße die Dose ein paar Mal auf die Tischplatte auf, und die Kaffeekörnchen bequemen sich zu einer etwas dichteren Lagerung, was das unmittelbare Problem löst. Aber so eng, wie der Hersteller sie in die Verpackung gepresst hat, sitzen sie nicht aufeinander. Den Behälter der Espressomaschine kann ich gehäuft füllen, ohne dass beim Einsetzen etwas überquillt. Und selbst dann ist zwischen den einzelnen Partikeln noch reichlich Platz für den Dampf, der das Koffein und andere Köstlichkeiten aus ihnen herauslöst.

Man kann sicher noch weitaus mehr Kraft zum Zusammenpressen aufwenden als die Espressomaschine. Aber irgendwann muss doch Schluss sein. Schließlich ist Kaffeemehl ja nicht beliebig kompressibel wie ein Gas. Also gibt es eine dichteste Packung der Kaffeekörnchen, in der sie ohne nennenswerte Zwischenräume den verfügbaren Raum füllen. Oder?

Das ist keineswegs selbstverständlich. Kaffeemehl ist dabei sogar noch ein vergleichsweise gutartiges Material, weil seine Körnchen zwar nicht kompressibel, aber immerhin deformierbar sind. Aber bei »harten« Teilchen, sprich solchen, die sich weder verformen noch einander durchdringen können, stellt sich das Problem in seiner ganzen Schärfe. Diese finden nämlich im Allgemeinen nicht von selbst die platzsparendste Anordnung. Bevor es so weit kommt, verklemmen sich die einzelnen Partikel gegenseitig derart, dass keines von ihnen sich noch rühren kann, wenn die anderen sich nicht ebenfalls bewegen. Das geschieht vorzugsweise beim Schütten, wenn also die einzelnen Teilchen vollkommen zufällig und in rascher Folge in den Behälter prasseln. Und die Ursache ist nicht

etwa die Reibung oder eine sperrige Form: Im mathematischen Modell leiden unter der Verklemmung auch Ensembles aus lauter gleich großen, unendlich glitschigen Kugeln.

Das ist bemerkenswert, denn gerade Kugeln sollte es im Prinzip nicht schwerfallen, sich in der dichtesten Packung zusammenzufinden. Eine erste Schicht verteilt sich auf dem Boden des Behälters in der bekannten Bienenwabenanordnung, in der jede Kugel sechs andere berührt. Je drei Kugeln, die alle miteinander in Kontakt sind, lassen zwischen sich einen Zwickel. In ihm findet bequem eine weitere Kugel Platz; sie und ihresgleichen bilden eine zweite Schicht, die genauso aussieht wie die erste und deswegen auch einer dritten Schicht Platz gibt, und so weiter.

Das ist die dichteste Kugelpackung, die – neben unzähligen namenlosen Obsthändlern und Kanonenkugelstaplern – schon Johannes Kepler (1571 – 1630) kannte. Seine Vermutung, es gebe keine dichtere Packung, blieb mehr als drei Jahrhunderte unbewiesen. Der mittlerweile vorliegende Beweis erregte erhebliches Aufsehen, weil wegen seiner Kompliziertheit niemand bereit ist, sich einen kompletten Überblick darüber zu verschaffen – nicht einmal sein Autor Thomas Hales (Spektrum der Wissenschaft 9/2003, S. 13). Immerhin wissen wir damit etwas sicherer, dass die Packungsdichte – der von den Körpern eingenommene Anteil am Gesamtvolumen – bei einer Packung gleicher Kugeln den Wert $\pi/\sqrt{18} \approx 74{,}048$ Prozent nicht übersteigen kann.

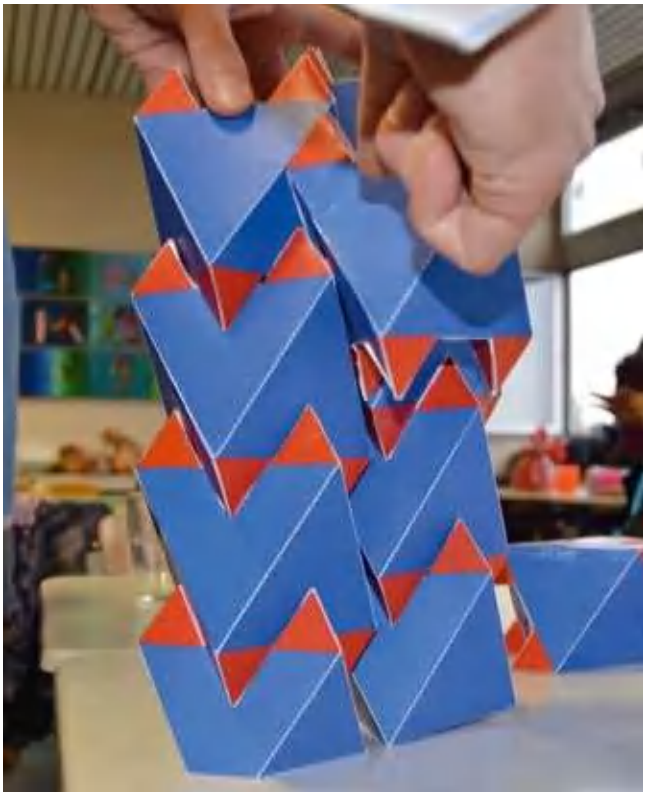
Aber zu dieser schönen Regelmäßigkeit finden selbst die symmetrischsten aller räumlichen Gebilde nur, wenn sie ausreichend Zeit haben. Wenn es schnell geht, bleiben Löcher. Theoretisch dürfen der keplerschen Kugelpackung sogar beliebig viele Kugeln entlang einer geraden Linie fehlen, ohne dass dieser »Tunnel« einstürzt.

Atome als Schüttgut: Kristalle und Gläser

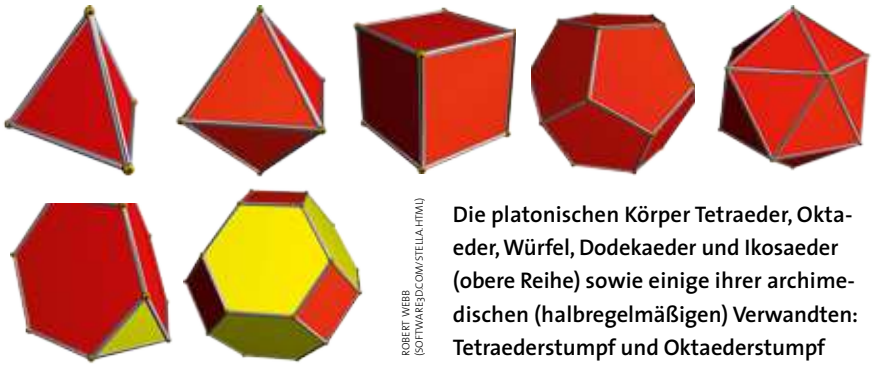
Mit solchen Fragen befasst sich eine ganze Forschungsgruppe an der Princeton University, und zwar bezeichnenderweise im Fachbereich Chemie. Denn mehr als für Kaffee, Kies und andere Streugüter interessieren sich die Wissenschaftler für Atome. Wenn die aus der flüssigen oder der Gasphase zu einem Festkörper kondensieren, ist das so ähnlich, wie wenn Kugeln in einen Behälter fallen. Wenn sie Zeit haben, sortieren sie sich zu den regelmäßigen Anordnungen, die als Kristallstrukturen bekannt sind. Bei schockartiger Abkühlung jedoch wird die Packung weniger dicht und viel unordentlicher – Materialforscher nennen das ein Glas. Die Gravitation spielt bei solchen Prozessen keine nennenswerte Rolle, und die Reibung schon gar nicht; stattdessen kommen chemische Bindungen zwischen den Atomen ins Spiel. Einerlei, welcher Art die Kräfte sind: Die Kühlung wirkt so rasch, dass den Atomen sehr bald die nötige Bewegungsenergie fehlt, um ihre Nachbarn beiseitezudrücken. Nur wenig später ist die Packung »kollektiv verklemmt« (collectively jammed): Sie würde sich selbst dann nicht rühren, wenn man mehrere Atome zugleich bewegen könnte.

Auf den ersten Blick ist ein solches Material ein Fall für die statistische Physik. Einen einzelnen Zustand präzise beschreiben zu wollen, ist nicht nur praktisch unmöglich, sondern auch sinnlos: Schon das nächste Stück Glas sieht im Kleinen völlig anders aus. Interessant sind nur Mittelwerte über große Ensembles von Zuständen, und zwar über die unordentlichsten; denn die sind die wahrscheinlichsten. Also suchten die Forscher nach Zuständen maximaler Entropie – und kamen in diesem speziellen Fall nicht weit. Der Versuch, ein Zustandsensemble namens »zufällige geschlossene Packung« (random closed packing, RCP) theoretisch sauber zu definieren, scheint gescheitert. Zu allem Überfluss nehmen die echten Gläser je nach den Einzelheiten des Herstellungsprozesses deutlich verschiedene Dichten an.

Angesichts dieser Situation entschieden sich Salvatore Torquato, der Chef der erwähnten Arbeitsgruppe aus Princeton, und sein Kollege Yang Jiao, das Problem von einer anderen Seite aus anzugehen: An Stelle von Mittelwerten großer Ensembles aus gleichen Teilchen studieren sie deren mögliche Anordnungen in der unmittelbaren Nachbarschaft eines einzelnen Parti-



In Salvatore Torquatos Raumfüllung kommen auf jedes Oktaeder sechs Tetraeder mit einem Drittel der Kantenlänge, was zusammen ein gehörntes Oktaeder ergibt (links oben). Die Klasse 7a des Mannheimer Moll-Gymnasiums hat einen ganzen Turm gehörnter Oktaeder hergestellt (links unten). Mehrere solcher Türme, in der Höhe gegeneinander versetzt, ergeben die Raumfüllung (rechts).

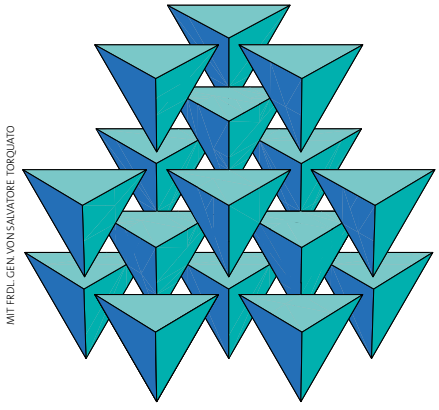


ROBERT WEBB (SOFTWARE3D.COM/STELLA.HTML)

Die platonischen Körper Tetraeder, Oktaeder, Würfel, Dodekaeder und Ikosaeder (obere Reihe) sowie einige ihrer archimedischen (halbregelmäßigen) Verwandten: Tetraederstumpf und Oktaederstumpf

kels. Was dabei zu finden ist, muss in seinen Auswirkungen nicht auf einen derart mikroskopischen Bereich beschränkt bleiben. Interessant sind lokale Anordnungen, an die man Kopien ihrer selbst ansetzen kann, an die Kopie wieder eine Kopie und so weiter. So ergibt sich aus lauter Exemplaren einer gewissen Grundstruktur ein periodisches Muster. Wenn es sich in drei voneinander unabhängigen Raumrichtungen wiederholt, ist es ein Kristall – oder eben ein ausgedünnter Kristall, wenn die Packung Löcher oder gar Tunnel hat. Die ist zwar überaus ordentlich, aber vielleicht kann man von ihr etwas über ihre unordentlichen Artgenossen lernen.

In den letzten Jahren hat Torquato seine Untersuchungen von runden auf eckige »Atome« erweitert. Das ist nicht so albern, wie es zunächst klingt; denn so rund, wie man sie sich normalerweise vorstellt, sind Atome gar nicht. So legen die vier Elektronen in der äußersten Hülle eines Kohlenstoffatoms den größten Wert auf Distanz voneinander.



MIT FRDL. GEN. VON SALVATORE TORQUATO

Das optimale Gitter aus parallelverschobenen regulären Tetraedern

Aus diesem Grund halten sie sich am liebsten an den Ecken eines Tetraeders auf; das ist der Körper, der von vier gleichseitigen Dreiecken begrenzt wird. In der Tat darf man sich die Kohlenstoffatome in einem Diamantkristall als Tetraeder mit leicht abgestumpften Spitzen vorstellen (Spektrum der Wissenschaft 11/2007, S. 36).

Damit landete Torquato unversehens bei der Frage, wie man lauter gleiche eckige Körper möglichst dicht in den Raum packen kann. Und weil man immer am besten mit dem einfachsten Fall anfängt, konzentrierte er seine Untersuchung auf die fünf regelmäßigsten: die platonischen Körper Tetraeder, Oktaeder, Würfel, Dodekaeder und Ikosaeder (Bilderreihe ganz oben).

Beim Würfel ist das Problem schnell erledigt: Klotz an Klotz zu stapeln ist keine Kunst. Man kann sogar ganze Ebenen einer Würfelpackung gegeneinander verschieben, ohne die perfekte Raumfüllung von 100 Prozent zu beeinträchtigen.

Allgemein nutzen Polyeder, also von ebenen Flächen begrenzte Körper, den verfügbaren Raum besser aus als Kugeln. Zwischen bündig aufeinandergelegten Grenzflächen bleibt eben überhaupt keine Luft, während krummflächig begrenzte Körper unvermeidlich gewisse Zwickel zwischen sich lassen.

Alle anderen platonischen Körper sind keine Raumfüller. Gleichwohl kann man versuchen, auf sie das Rezept anzuwenden, das beim Würfel so erfolgreich war. Das heißt: Man definiert drei Verschiebungsvektoren und füllt den Raum mit lauter Exemplaren des Körpers, die gegeneinander mit diesen Vektoren parallelverschoben sind. Anders ausgedrückt, man konstruiert einen Kristall, dessen Fundamentalzelle nichts weiter enthält als ein Exemplar des Polyeders selbst. Unter allen denkbaren Tripeln von Verschiebungsvektoren sucht man dann dasjenige, das die größte Packungsdichte erzeugt.

Das wäre ein Maximierungsproblem für eine Funktion (die Packungsdichte) von neun reellen Variablen (den Koordinaten der drei Verschiebungsvektoren) und damit eine Standard-Übungsaufgabe in numerischer Mathematik – wenn nicht die Nebenbedingung hinzukäme, dass die verschobenen Exemplare des Körpers einander nicht durchdringen dürfen. Wegen der eckigen Gestalt der Polyeder ist diese Bedingung nicht nur mühsam zu formulieren; sie erschwert auch das Problem so, dass Torquato und seine Kollegen eigens dafür einen Algorithmus entwickeln mussten.

Optimale Tetrapacks

Für das Tetraeder ist das Ergebnis der Optimierung enttäuschend. Der dichteste Kristall aus parallelverschobenen Tetraedern kommt auf eine Packungsdichte von mickrigen 18/49 ≈ 36,73 Prozent. Ein Blick auf das Ergebnis (Bild links unten) lässt den Grund erahnen: Als einziger platonischer Körper verfügt das Tetraeder nicht über Paare paralleler Flächen. Deswegen können Flächen zweier benachbarter Körper nie bündig aneinanderliegen, nicht einmal teilweise. Vielmehr piekst an jede Fläche eines Tetraeders eine Ecke vom Nachbarn, und dazwischen bleibt jede Menge Luft.

Die naheliegende Abhilfe besteht darin, zwei Tetraeder Fläche an Fläche aneinanderzusetzen. Das so entstehende »Dimer«, ein von sechs gleichseitigen Dreiecken begrenzter, aber nicht platonischer Körper (nicht alle Ecken sind gleich), hat zwar immer noch keine parallelen Grenzflächen, ist aber immerhin punktsymmetrisch, was erfahrungsgemäß günstig für eine dichte Packung ist.

Das Verfahren lässt sich verallgemeinern. Fünf Tetraeder passen an eine gemeinsame Kante. Fast bilden sie zusammen eine fünfseitige Doppelpyra-

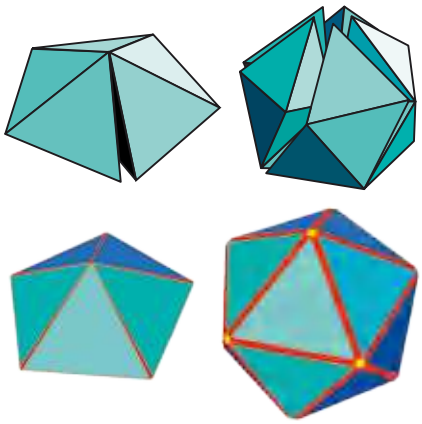
mide; zur geschlossenen Figur fehlt nur noch ein sehr schmaler Keil (Bild rechts, linke Seite). Da kann man getrost eine Packung mit solchen Doppelpyramiden suchen und jede von ihnen hinterher durch fünf Tetraeder ersetzen. Dabei verliert man zwar das Keilvolumen, und die einzelnen Tetraeder klappern ein bisschen; aber es ergeben sich auf diese Weise schon sehr dichte Packungen. In manchen so errechneten Fundamentalzellen sind zahlreiche »Wagenräder« – so Torquatos fantasievolle Bezeichung für die Doppelpyramiden – auf die abenteuerlichste Weise zusammengestopft (Bild unten).

Ein anderes Beispiel: 20 Tetraeder, die einen Eckpunkt gemeinsam haben, fügen sich fast zu einem Ikosaeder zusammen (Bild rechts, rechte Seite). Wieder ergibt sich daraus ein Rezept zur Erzeugung dichter, wenn auch klappriger Packungen.

In den letzten fünf Jahren gab es einen regelrechten Wettlauf um die dichteste Tetraederpackung. Ein Rekord jagte den anderen, vor allem weil sich ein Kollege vom mathematischen Fachbereich der Princeton University maßgeblich an dem Rennen beteiligte: John Horton Conway, dem die Unterhaltungsmathematik eine Fülle von Ideen verdankt, allen voran den zellulären Automaten namens »Game of Life«. Derzeitiger Rekordhalter ist eine Fundamentalzelle aus zwei Dimeren mit einer stolzen Packungsdichte von 4000/4671 ≈ 85,63 Prozent.

Für die restlichen platonischen Körper verläuft die Suche weniger dramatisch. Allem Anschein muss man hier für die optimale Packung nicht vom einfachsten Weg – die Fundamentalzelle enthält nur einen Körper – abgehen.

Eine Überraschung gibt es trotzdem, und zwar beim Oktaeder. Üblicherweise findet man diesen Körper aus acht gleichseitigen Dreiecken – vier um jede Ecke – auf der Spitze stehend dargestellt, so als ob die Pyramiden von Giseh einen ebenfalls pyramidenförmigen Unterbau hätten, dessen Spitze tief in die Erde hineinragt. So kommen seine Symmetrieeigenschaften am schönsten zur Geltung, und der Querschnitt des Körpers auf Bodenniveau ist ein Quadrat. Da kann man in Gedanken derartige Doppelpyramiden Kante an Kante aneinandersetzen, so dass ihre Querschnitte die Ebene füllen wie die üblichen Badezimmerkacheln. Nur gibt das keine besonders gute Raumfüllung. In die Lücken zwischen den Oktaedern passen nicht etwa Oktaeder, sondern Tetraeder mit gleicher Kantenlänge. Das gibt eine bekannte Raumfüllung mit zweierlei verschiedenen platonischen Körpern. Die Stangenkonstruktionen an den Decken mancher Messehallen und Flughafenempfangsgebäude folgen diesem Muster.



MIT FRDL. GEN. VON SALVATORE TORQUATO

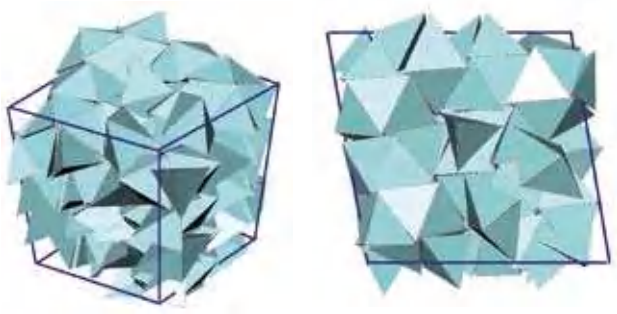
Fünf Tetraeder um eine gemeinsame Kante herum ergeben fast eine fünfseitige Doppelpyramide (links oben), 20 mit einer gemeinsamen Ecke fast ein Ikosaeder (rechts oben). Das ganze Ensemble wirkt ansehnlicher, wenn der Winkelfehler gleichmäßig verteilt wird (untere Bilder).

Oktaedertürme mit Variationen

Wenn die möglichst dichte Packung aber nur Oktaeder enthalten soll, legt man den Achtflächner besser mit einem seiner Dreiecke auf den Boden. Die dazu parallele Deckfläche ist gegenüber der Bodenfläche um 60 Grad verdreht. Setzt man noch ein Oktaeder verdreht darauf, so dass die Flächen genau aufeinander zu liegen kommen, entsteht ein Dimer, dessen Boden- und Deckfläche durch schlichte Parallelverschiebung auseinander hervorgehen. Durch periodische Fortsetzung in dieser Richtung wird daraus ein massiver Turm mit abwechselnd auswärts- und einwärtsgekippten, dreieckigen Wänden. Jetzt müsste man nur noch lauter derartige Türme, geeignet in der Höhe verschoben, nebeneinanderstellen …

Es stellt sich heraus: Das Ergebnis ist nicht optimal. Besser funktioniert, was auf den ersten Blick viel ungeschickter aussieht, nämlich Oktaeder einfach parallelverschoben aufeinanderzustapeln. Dann liegt die Bodenfläche des oberen Oktaeders zwar platt auf der Deckfläche des unteren, aber verdreht. Die gemeinsame Fläche ist ein regelmäßiges Sechseck, und von jeder Fläche liegen drei kleine Dreiecke mit einem Drittel der Kantenlänge an der Luft.

Das bleibt auch in der fertigen Packung so. Aber das gesamte Luftvolumen hält sich in engen Grenzen. Ein Oktaederturm hat zwar auf jedem Stockwerk merkwürdige erkerartige Vorsprünge; aber die ebenso stachligen Nachbartürme schmiegen sich so eng an den ersten Turm an, dass die Hohlräume klein bleiben. Die an der Luft liegenden kleinen Dreiecke fügen sich zu Tetraedern zusammen. Die so definierte Packung mit Oktaedern kommt auf



MIT FRDL. GEN. VON SALVATORE TORQUATO

Noch vor zwei Jahren bestand die dichteste bekannte Tetraederpackung aus ziemlich wild platzierten derangierten »Wagenrädern«. Ihre Fundamentalzelle mit 314 Tetraedern (links von der Seite, rechts von oben gesehen) kommt auf eine Packungsdichte von 82,26 Prozent.

die Dichte von 18/19 ≈ 94,737 Prozent (Bilder S. 68/69).

Quasi nebenbei haben Conway, Jiao und Torquato eine neue Raumfüllung mit zweierlei platonischen Körpern entdeckt. Auf jedes Oktaeder kommen sechs Tetraeder mit einem Drittel der Kantenlänge. Die kann man zum Beispiel an die Ecken von Boden- und Deckfläche des Oktaeders setzen. Das so entstandene gehörnte Oktaeder ist ein Raumfüller.

Obendrein gibt es einen stetigen Übergang von der altbekannten Raumfüllung mit Oktaedern und Tetraedern gleicher Kantenlänge zur neuen. Man kann die Oktaeder der konventionellen Füllung auf eine sehr spezielle Weise gegeneinander verschieben. Dabei schrumpfen die bereits vorhandenen Tetraeder, und neue Löcher tun sich auf. In ihnen wachsen kleine Tetraeder heran. Am Ende erreichen die schrumpfenden und die wachsenden Tetraeder die gemeinsame Kantenlänge von einem Drittel der Oktaederkantenlänge.

CHRISTOPH PÖPPE

Der gehörnte doppelte Tetraederstumpf: Zwei Tetraederstümpfe (grün und blau) sitzen mit Sechseckflächen bündig aufeinander. Türme aus solchen Dimeren passen so gut aneinander, dass nur sehr kleine tetraederförmige Löcher bleiben. In dem abgebildeten Modell sind diese wie beim gehörnten Oktaeder dem eigentlichen Körper aufgesetzt. Sie nehmen zusammen nur ein halbes Prozent vom Gesamtvolumen ein.

Diese Zerlegung des Raums hätten schon die Griechen der Antike finden können; mehr als die klassische Geometrie des Raums braucht man nicht dafür. Merkwürdig, dass weder sie noch die Generationen nachfolgender Mathematiker darauf gekommen sind, bis ihnen jüngst die Materialforscher den Anstoß gaben. Und selbst die haben ein bisschen lang für ihre Entdeckung gebraucht, meinen Torquato und Kollegen, weil sie zu sehr auf ihre Kugeln fixiert waren.

Inzwischen sind sie von den platonischen zu den etwas weniger regelmäßigen archimedischen Körpern übergegangen. Diese sind zwar immer noch von regelmäßigen Vielecken begrenzt, aber die dürfen voneinander verschieden sein, solange um jede Ecke herum dieselben Flächen in derselben Reihenfolge liegen.

Raumwunder Tetraederstumpf

Unter den insgesamt 13 archimedischen Körpern gibt es wieder einen, bei dem man nach der dichtesten Packung nicht lange suchen muss: Der Oktaederstumpf aus acht Sechsecken und sechs Quadraten ist ein bekannter Raumfüller. Sein schwierigster Kollege scheint dagegen der Tetraederstumpf aus vier Sechsecken und vier Dreiecken zu sein. Er entsteht, indem man dem Tetraeder seine vier Ecken abschneidet, und zwar so, dass zusätzlich zur Ecke ein Drittel jeder dort endenden Kante dem Messer zum Opfer fällt. Von den ursprünglichen Dreiecken des Tetraeders bleiben Sechsecke übrig, die Schnittflächen selbst sind Dreiecke, und punktsymmetrisch ist der Stumpf ebenso wenig wie das intakte Tetraeder (Bild S. 70 oben, untere Reihe).

Umso überraschender ist es, dass man mit diesem sperrigen Körper eine fast perfekte Packung erzielen kann. Setzt man zwei Tetraederstümpfe mit Sechsecksflächen derart aufeinander, dass ein Dreieck des einen Körpers an ein Sechseck des anderen angrenzt, dann liegen diese beide Flächen in einer Ebene. So entsteht ein Rhomboeder (ein Würfel mit zu Rhomben verzerrten Flächen), dem die beiden spitzen Ecken samt einem Drittel der angrenzenden Kanten abgeschnitten sind. Diese abgestumpften Rhomboeder schmiegen sich so glatt aneinander, dass abermals nur tetraederförmige Löcher mit einem Drittel der Kantenlänge übrig bleiben. Insgesamt erreicht die Packungsdichte den traumhaften Wert von 99,5 Prozent (Bild links).

DER AUTOR

Christoph Pöppe ist promovierter Mathematiker und Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

QUELLEN

Conway, J. H., Torquato, S.: Packing, Tiling and Covering with Tetrahedra. In: Proceedings of the National Academy of Sciences 103, S. 10612–10617, 2006

Conway, J. H. et al.: A New Family of Tilings of Three-Dimensional Euclidean Space by Tetrahedra and Octahedra. In: Proceedings of the National Academy of Sciences 108, S. 11009–11012, 2011

Jiao, Y., Torquato, S.: A Packing of Truncated Tetrahedra that Nearly Fills All of Space. September 2011. **http://arxiv.org/abs/1107.2300**

Torquato, S., Jiao, Y.: Dense Packings of the Platonic and Archimedean Solids. In: Nature 460, S. 876–879, 2009

Torquato, S., Stillinger, F. H.: Jammed Hard-Particle Packings: From Kepler to Bernal and Beyond. In: Reviews of Modern Physics 82, S. 2633–2672, 2010

WEBLINKS

http://cherrypit.princeton.edu/papers.html
Große Literaturliste von Torquatos Gruppe; darin auch Links zu den oben genannten und weiteren Arbeiten

www.spektrum.de/page/fe_seiten?article_id=587205
Christoph Pöppe zur Raumfüllung aus Tetraedern und Oktaedern

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1135752
Dort finden Sie auch Bastelvorlagen für gehörnte Oktaeder und deren abgeschnittene Bodenstücke zur Herstellung lückenloser Raumfüllungen.

SERIE ENERGIE | TEIL 3

Die unerschöpfliche Kraft des Wassers

Die Wasserkraft ist weltweit der größte erneuerbare Stromerzeuger. Dabei nutzen wir bislang erst ein Viertel des Potenzials. Neben konventionellen Wasserkraftwerken, etwa Pumpspeicheranlagen, wird zunehmend ein riesiges, noch unerschlossenes Reservoir attraktiv: die Energie der Weltmeere.

Von Robert Gast

BEIDE FOTOS: PELAMIS WAVE POWER LTD.

ÜBERBLICK

DIE ZUKUNFT DER ENERGIE

Teil 1	Strom aus der Sonne	Dezember 2011
Teil 2	Windräder	Januar 2012
Teil 3	**Wasserkraft**	**Februar 2012**
Teil 4	Biotreibstoffe	März 2012
Teil 5	Energiespeicher I: Batterien	April 2012
Teil 6	Energiespeicher II: Wasserstoff	Mai 2012

»Pelamis« heißt diese 180 Meter lange Pilotanlage aus Metall. Vor Portugals Atlantikküste erzeugen Kolbenpumpen in den Gelenken Energie.

Die Geschichte der Meeresenergie beginnt mit einer Plastikente. Sie sollte auf dem Atlantik schwimmen, im Auf und Ab der Wellen wippen und die Bewegung in Strom umwandeln. Stephen Salter hatte das Konzept 1974 als Reaktion auf die Ölkrise entworfen. Entlang der Küstenlinie aufgereiht, sollten Dutzende der Geräte die Stromversorgung der Zukunft sichern. »Einige hundert Kilometer könnten den Energiebedarf Großbritanniens decken«, schrieb der schottische Ingenieur seinerzeit im Wissenschaftsmagazin »Nature«. Es war ein kühnes Vorhaben zu Beginn des Zeitalters der erneuerbaren Energien. Aber Salters Ente blieb eine Vision. 1983 war die Ölkrise überwunden, und das britische Abgeordnetenhaus entzog dem Projekt die Gelder.

In den folgenden Jahrzehnten verschwand die Idee, Ozeane zur Stromerzeugung zu nutzen, aus der öffentlichen Wahrnehmung. Daher stammt der Beitrag des Wassers zur Energieversorgung heute ausschließlich aus Flüssen und Stauseen. Wasserkraftwerke decken etwa 16 Prozent des weltweiten Strombedarfs, was mit Abstand der größte Beitrag regenerativer Energiequellen zur Elektrizitätserzeugung ist. Die meisten Wasserkraftwerke stehen in China, Brasilien, den USA, Kanada und Russland. Und manche Nation vertraut fast vollständig auf die Kraft des Wassers: Norwegen bezieht seinen kompletten Strom daraus, die Schweiz und Österreich immerhin mehr als die Hälfte. In Deutschland stammen gerade einmal 3,4 Prozent der Elektrizität aus Wasserkraft.

Kraftwerke gibt es in verschiedensten Größen. An Talsperren oder Staudämmen nutzen sie die potenzielle Energie von Wasser, das viele Meter fällt und dabei gewaltige Turbinen antreibt. In Flüssen arbeiten oft kleinere Laufwasserkraftwerke, die den Flusslauf stauen, um eine Fallhöhe von wenigen Metern zu erzeugen. Für schmalere Flüsse eignen sich unter anderem so genannte Wirbelwasserkraftwerke, bei denen Wasser über eine Rampe abgezweigt wird und beim Rückfluss einen speziell geformten Wirbelrotor antreibt.

Unter den erneuerbaren Energiequellen ist Wasserkraft die effizienteste: Über 90 Prozent der von Turbinen aufgenommenen Bewegungsenergie des Wassers lassen sich mittels Generatoren in Strom umwandeln. Der Weltklimarat der Vereinten Nationen IPCC schätzt in einer im Mai 2011 erschienenen Studie (»Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation«), dass sich die derzeit durch diese Energiequelle erzeugte Strommenge theoretisch vervierfachen ließe. Das Potenzial steckt zum einen in den 45 000 größeren Dämmen, die rund um die Welt Flussläufe stauen. Lediglich ein Viertel von ihnen wird momentan zur Stromproduktion genutzt, der Rest dient anderen Zwecken: der Flutkontrolle, der Landwirtschaft oder der Wasserversorgung. Die meisten von ihnen könnten laut der Einschätzung des Weltenergierats zu Wasserkraftwerken erweitert werden. Vor allem in Afrika, Lateinamerika und Asien gibt es darüber hinaus noch etliche Landstriche, die sich für Dammprojekte eignen, wo es bisher jedoch an Investoren fehlt.

AUF EINEN BLICK

STÜRMISCHE ZEITEN

1 Die Wasserkraft ist mit Abstand die am weitesten ausgebaute **erneuerbare Energieform**, sie deckt aktuell 16 Prozent des weltweiten Elektrizitätsbedarfs. Vor allem in Teilen Asiens und Afrikas kann sie noch massiv ausgebaut werden.

2 Ein völlig unerschlossenes Reservoir an Wasserkraft bieten die Weltmeere. Sowohl **Wellen-** als auch **Gezeitenkraftwerke** könnten über zehn Prozent des weltweiten Strombedarfs decken.

3 Die dafür nötigen Technologien stecken noch in den Kinderschuhen, auch wenn seit einigen Jahren Dutzende **Prototypen** erprobt werden. Welche von ihnen sich durchsetzen werden, muss sich zeigen.

Allerdings greifen derartige Großprojekte in der Regel erheblich in bestehende Ökosysteme ein, außerdem müssen oft tausende Menschen umgesiedelt werden. Und so CO_2-neutral, wie man einst dachte, sind sie auch nicht: Stauseen setzen unter anderem erhebliche Mengen Methan frei, da Bakterien organisches Material auf dem Meeresgrund vergären und das Treibhausgas anschließend nach oben steigt. Auch beim Sturz des Wassers durch die Turbinen gelangt Methan in die Atmosphäre. Allerdings ist umstritten, wie viel klimaschädliche Gase tatsächlich aus Stauseen stammen. Jüngst legten Forscher in einer in »Nature Geoscience« erschienenen Studie nahe, dass ihr Beitrag kleiner ist als bisher angenommen. Von dem Effekt betroffen seien vor allem Seen in tropischen Gefilden nahe dem Äquator.

Die kühleren Stauseen Europas sind von dieser Diskussion aber auch deswegen kaum berührt, weil hier so gut wie alle Standorte für Talsperren bereits erschlossen sind. Ein Ausbau auf dem europäischen Kontinent ist daher hauptsächlich noch durch die Aufrüstung und Erneuerung bestehender Anlagen möglich. Laut Angaben der Europäischen Kommission beläuft sich das Potenzial auf 54 Milliarden Kilowattstunden pro Jahr, der Großteil davon schlummert in Osteuropa. Zum Vergleich: Jährlich verbraucht Deutschland rund 600 Milliarden Kilowattstunden Strom. Hier zu Lande könnte eine Erneuerung bestehender Klein- und Großanlagen immerhin 3,5 Milliarden Kilowattstunden pro Jahr bringen, schätzte das Bundesumweltministerium (BMU) in einer 2010 veröffentlichten Studie – genug Strom für über 200 000 Haushalte. Zubauten sind in vielen der 7500 Kleinwasserkraftwerke mit einer Kapazität von unter einem Megawatt möglich, aber auch in manchen der 354 größeren Anlagen an Talsperren. Die Bundesregierung hat in den letzten Jahren vor allem Anreize für den Ausbau kleiner Wasserkraftanlagen geschaffen: 2009 hob sie die Einspeisepauschale für solche Installationen auf bis zu 12,67 Cent pro Kilowattstunde an.

Bei der Erneuerung spielt die Verbesserung der Technik eine wesentliche Rolle. Mittels Computersimulationen optimierte Turbinen zeigen einen bis zu fünf Prozent höheren Wirkungsgrad als ältere Exemplare bei Betriebsbeginn. Gegenüber 60 Jahre alten Turbinen, die in vielen Wasserkraftwerken aus den 1950er Jahren heute noch laufen, ergibt sich sogar ein Effizienzzuwachs von bis zu elf Prozentpunkten. Aber bei der Technologieentwicklung geht es nicht nur um maximale Leistung. So werden Turbinen entwickelt, die hier einige Prozent weniger erbringen, dafür aber den Großteil der Fische überleben lassen, die durch die Anlage schwimmen. Auch das ist inzwischen ein ökonomisches Kriterium: In Deutschland dürfen seit einer Gesetzesnovelle aus dem vergangenen Jahr nur noch Wasserkraftanlagen gebaut werden, die geeignete Maßnahmen zum Schutz der Flussbewohner treffen und stets einen Mindestwasserstand gewährleisten.

Erneuerungen wird es vor allem im Voralpenland geben. In Bayern, das mit über 4000 Anlagen mit Abstand die meisten aufweist, will die Landesregierung den Ertrag des Wassers bis 2021 um 15 Prozent steigern, womit Wasserkraft fast ein Fünftel des Strombedarfs decken würde. Aber auch zu DDR-

Beim »Wave Dragon«, hier ein Prototyp vor der dänischen Westküste, schwappt Wasser über die rote Rampe in ein Becken und erzeugt im Rückfluss über eine Turbine Elektrizität.

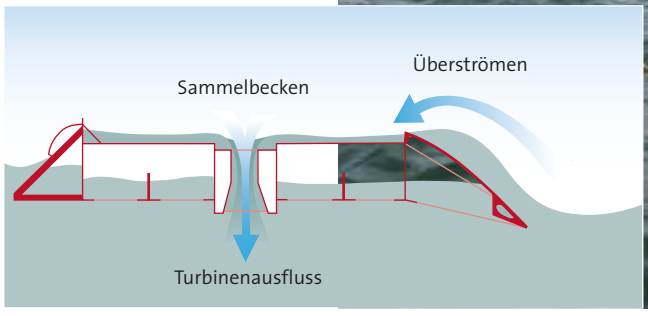


FOTO: WAVE DRAGON APS; GRAFIK: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK, NACH: WAVE DRAGON

BEIDE FOTOS: VOITH HYDRO

Dieser Unterwasserrotor steht vor Südkoreas Südküste. Gebaut wird er von der Firma Voith Hydro in Heidenheim (kleines Bild).

Zeiten stillgelegte Flusskraftwerke in Ostdeutschland könnten saniert werden.

Auf Bundesebene soll dagegen vor allem der Wind die Energiewende vorantreiben. Im Konzept vom Juni 2011, das den Ausbau der erneuerbaren Energien bis 2050 skizziert, taucht Wasserkraft nur an einer Stelle auf: Mittelfristig sollen alle deutschen Standorte für Pumpspeicherkraftwerke erschlossen werden (siehe dazu auch den Artikel ab S. 84). Sie werden gebraucht, um in Zukunft überschüssigen Strom aus Solar- und Windenergie zu speichern. 34 solche Speicherkraftwerke gibt es derzeit in Deutschland. Sie können 40 Millionen Kilowattstunden speichern. Ihr zusätzliches Ausbaupotenzial ist eher gering, schätzte der von der Bundesregierung eingesetzte Sachverständigenrat für Umweltfragen SRU 2010. Denn es gibt nur noch wenige geeignete Flächen, und diese müssen oft unter erheblichen Eingriffen in die Natur erschlossen werden. In der Bevölkerung schürt das massive Proteste – etwa in Atdorf im Schwarzwald, wo bis Ende des Jahrzehnts das größte Pumpspeicherkraftwerk der Republik entstehen soll. Umfangreiche Möglichkeiten für zusätzliche Anlagen sieht der Sachverständigenrat dagegen in Skandinavien: Etwa 120 Milliarden Kilowattstunden ließen sich in norwegischen und schwedischen Bergseen speichern, wenn sie mit Pumpen und Steigleitungen zu Wasserspeichern ausgebaut werden. In den Bergseen Österreichs und der Schweiz schlummert zusätzlich noch einmal ein Viertel der Kapazität der skandinavischen Länder.

Nationen ohne Gebirge können Wasserkraft dagegen bislang so gut wie nicht nutzen. Doch vielleicht ändert sich das bald, denn Salters Ente ist wieder im Gespräch – oder zumindest ihre Nachkommen. Vor den Küsten Europas versuchen derzeit über 100 Projekte, Strom aus dem Meer zu gewinnen. Vor allem die Strömungen der Gezeiten und das Auf und Ab der Wellen sollen Quellen fast unerschöpflicher Energie werden – so die Vision der Ingenieure.

Die Wellen der Weltmeere tragen pro Meter Küstenlinie Dutzende Kilowatt in sich. Zum Vergleich: Die Sonneneinstrahlung auf einen Quadratmeter Boden erbringt an einem wolkenlosen Tag eine Leistung von gerade einmal einem Kilowatt. Allerdings stammt auch die Energie der Wellen eigentlich von der Sonne. Diese heizt die Atmosphäre an verschiedenen Stellen unterschiedlich stark auf, was Winde hervorruft, die die Oberfläche des Ozeans aufrauen. Es entstehen hunderte Meter lange Meeresdünen, die in tiefen Gewässern praktisch keine Energie verlieren. Dadurch können sie ungestört weiterlaufen, bis sie eine Küstenlinie treffen – auch wenn der Wind längst aufgehört hat zu wehen. Besonders mächtige Wellen finden sich zwischen dem 30. und 60. Breitengrad. Zwar eignet sich nur ein Teil dieses Reservoirs zur Stromerzeugung, da sich Wellenkraftwerke nur in Küstenregionen mit ausreichendem Wellengang betreiben lassen und nur ein Teil der Wellenenergie in Strom umgewandelt werden kann. Aber selbst mit diesen Einschränkungen kommen Schätzungen auf ein technisch nutzbares Potenzial, das zehn Prozent des weltweiten Strombedarfs entspricht.

Es war die Vision, dieses Reservoir anzuzapfen, die Frank Neumann Anfang des Jahrtausends nach Portugal brachte. »Das war damals das Mekka der Meeresenergien«, sagt der deutsche Ingenieur. 2003 trat er eine Stelle am Wave Energy Centre (WavEC) in Lissabon an, das als Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Industrie »alles dafür tun soll, damit die Wellenenergie so bald wie möglich Realität wird«. Der Ausbau der Meeresenergie sei jedoch Jahrzehnte hinter Fotovoltaik und Biomasse zurück, meint Neumann. »Hier wird noch die technische Machbarkeit überprüft.«

Schwingende Wassersäule treibt Turbine mit Luftstrom

Was das bedeutet, hat Frank Neumann hautnah miterlebt. Vor sechs Jahren übernahm das WavEC eines der ersten Wellenkraftwerke – und Neumann war dafür verantwortlich, die Anlage zum Laufen zu bringen. Im Fall von »Pico« war das ein Knochenjob. Auf dem Azorenarchipel mit dem 2351 Meter hohen Vulkan diesen Namens hatte eine Gruppe der Technischen Universität aus Lissabon bereits 1995 mit dem Bau einer am Ufer installierten Anlage begonnen. Sie sollte nach dem Prinzip der *Oscillating Water Column* funktionieren – zu Deutsch schwingende Wassersäule. Dabei wird eine Turbine nicht direkt vom Wasser angetrieben, sondern von einem Luftstrom, der entsteht, wenn Wellen in eine zum Meer hin offene Kammer einlaufen und die darin eingeschlossene Luft komprimieren.

Die kleine Betonkammer an der Inselküste hatte jedoch mit konstruktionsbedingten Geburtsfehlern zu kämpfen: Das Stahlfundament war wackelig, die Druckkammer löchrig. »Da waren Wissenschaftler und keine Ingenieure am Werk«, sagt Frank Neumann. Er und einer seiner Mitarbeiter brauchten Jahre, um die Mängel zu beseitigen. In den letzten drei Monaten des Jahres 2010 zahlte sich die Arbeit dann

INTERVIEW

»Noch ist Meeresenergie ein Abenteuer«

Interview mit **Kai-Uwe Graw,** Professor für Technische Hydromechanik an der TU Dresden. Seit 20 Jahren erforscht er Möglichkeiten, die Wellenenergie der Weltmeere nutzbar zu machen.

Spektrum: Herr Graw, ist es wirklich plausibel, dass allein die Energie aus den Meereswellen ein Zehntel des weltweiten Strombedarf decken könnte?

Professor Dr. Kai-Uwe Graw: Das ist durchaus plausibel. Allerdings versuchen wir seit über 20 Jahren, dieses Reservoir überhaupt nutzbar zu machen. Wie viel wir davon letztendlich erschließen können, muss man erst sehen. Theoretisch könnte man vor der Küste der Antarktis überall Wellenenergiekonverter aufstellen. Aber dann braucht es auch eine Möglichkeit, den Strom zum Nutzer zu bringen. Vielleicht haben wir irgendwann eine Speichertechnologie, etwa basierend auf Wasserstoff, mit der das gelingt. Doch das ist Zukunftsmusik. Im Nordatlantik hingegen befinden sich die Nutzer relativ nah an der Energiequelle. Aber auch da ist noch offen, wie viel Wellenenergie man in den nächsten Jahrzehnten in die Netze in Norwegen, Irland, Großbritannien, Portugal, Frankreich und Spanien einspeisen kann.

Wird die Meeresenergie – trotz der rauen Umgebung, in denen Anlagen betrieben werden müssen – in den kommenden Jahrzehnten preislich mit anderen erneuerbaren Energieformen konkurrieren können?

Graw: Wenn Wellenenergieanlagen eine Vergütung für die Stromeinspeisung erhalten würden wie die Solarenergie in Deutschland, dann hätten wir heute schon viele davon. Aber überall in Europa liegen die Vergütungen mindestens eine Größenordnung unterhalb der für Sonnenenergie. Auch wenn man die Geldmengen, die in den 1980er Jahren in die Kernenergie gesteckt worden sind, in die Ozeane investiert hätte, gäbe es heute schon Meeresenergiekraftwerke. Die würden vielleicht nicht lange halten und noch keinen ausreichenden Wirkungsgrad haben. Mit einer hohen Einspeisepauschale hätten Investoren das Risiko akzeptiert, denn nach ein paar Jahren hätten sich die Anlagen amortisiert. So aber muss eine Anlage 20 Jahre halten, damit sie sich rechnet. Solche Investitionen lohnen sich für ein Unternehmen nur, wenn es irgendwann Marktführer wird. Das aber lässt sich nicht planen.

Ist die Technik denn wirklich schon ausgereift?

Graw: Nein, alle laufenden Projekte haben noch Macken und Schwächen. Das ist wie beim Autobau: Da können Sie ein kleineres Modellauto gebaut haben, das gut funktioniert, und dann hat das große Auto am Ende doch seine Probleme – obwohl davor schon so viele Autos gebaut wurden! Bei der Meeresenergie gab es vorher gar nichts. Das ist also noch ein technologisches Abenteuer. Die Vorstellung, die auch Politiker oft haben, ist: Man stellt Geld bereit, und übermorgen gibt es ein funktionierendes System. Das klappt auf keinem Gebiet.

Was ist besser: Wellen- oder Gezeitenenergie?

Graw: Die Wellenkraft hat zweifellos das größere Potenzial. Mit der Gezeitenkraft gibt es zwar schon mehr Erfahrungen, doch sie hat das Problem, dass das Gezeitenhubkraftwerk in Saint-Malo das Image dieser Technologie stark negativ beeinflusst hat. Bei der Energiegewinnung aus Gezeitenströmungen, bei der man keinen riesigen Damm baut, sondern unter Wasser Rotoren installiert, werden die Auswirkungen auf die Umwelt wesentlich geringer sein. Allerdings gilt auch da: Stellt man viele Rotoren auf den Meeresgrund, gibt es auch da Umweltfolgen.

Gibt es potenzielle Standorte für die Meeresenergie in Deutschland?

Graw: Vor Hörnum auf Sylt zum Beispiel wären die Strömungsgeschwindigkeiten groß genug für ein Gezeitenkraftwerk. Das wäre sogar aus Sicht des Küstenschutzes sinnvoll, denn die Insel wird dort nach und nach von der Meeresströmung abgetragen. Wenn man in der Meerese nge Rotoren installiert, entzieht man der Strömung Energie, und das Land verschwindet weniger schnell. Aber davon abgesehen gibt es für einen eigenen Industriezweig nicht genügend Standorte an der Nordseeküste. ~

Die Fragen stellte **Robert Gast.**

aber aus: Während dieser Zeit habe Pico fast kontinuierlich Strom ins Netz eingespeist, erzählt Neumann nicht ohne Stolz. Die Leistung habe zwar nur bei etwa 50 der 400 Kilowatt gelegen, für die die Anlage ausgelegt ist. »Doch es hat gezeigt, wie lösbar die Probleme der Wellenergie sind, wenn man Geld und Mühe investiert.« An Geld fehlt es nun allerdings wieder bei Pico. Denn vor einigen Monaten ist die Steuerungselektronik der Anlage kaputt gegangen, seit 2008 aber kommt niemand mehr für Sanierungen auf. »Sowohl Baufirmen als auch Stromerzeuger schrecken vor Investitionen in die Branche zurück«, sagt Neumann.

Seeschlangen in Seenot

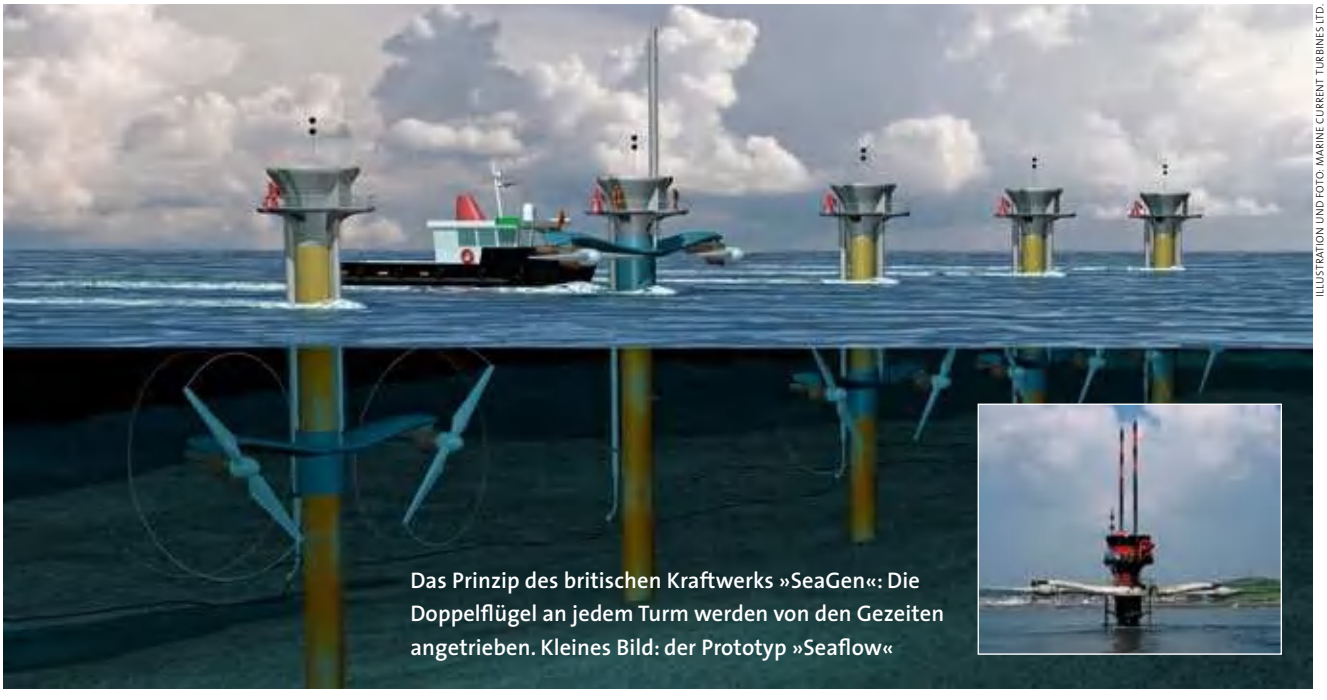
In Portugal mag das an überzogenen und dann enttäuschten Erwartungen der Vergangenheit liegen. Eigentlich wollte das Land Weltmarktführer in Sachen Meeresenergie werden. Noch vor vier Jahren gab die portugiesische Regierung die Devise aus, innerhalb weniger Jahre diese Form der Energiegewinnung so weit auszubauen, dass sie maßgeblich dabei helfen kann, insgesamt 45 Prozent des Stroms aus erneuerbaren Energien zu gewinnen. Eine Einspeisepauschale von 32 Cent pro Kilowattstunde sollte den nötigen Anreiz liefern.

Das Vorzeigeprojekt der Meeresenergie in Portugal glich einer Seeschlange. Es sollte die Kraft der Wellen mit einer anderen Methode als Pico nutzen: Die 180 Meter lange »Pelamis« bestand aus fünf Segmenten, deren Gelenke geknickt wurden, wenn die zum Wellenkamm hin ausgestreckte Schlange von einer Welle erfasst wurde (Foto S. 75). In den Gelenken installierte Kolbenpumpen sollten über ein Hydrauliksystem eine Leistung von 750 Kilowatt erzeugen. Aber die 8,5 Millionen teure Wellenfarm mit drei knallroten Seeschlangen scheiterte 2009 fünf Kilometer vor der Atlantikküste bei Póvoa de Varzim. Die Geräte gingen wiederholt kaputt, und schließlich meldete der australische Hauptinvestor Babcock & Brown Konkurs an. Zuvor hatte es schon massive Verzögerungen gegeben, unter anderem beim Anschluss der schwimmenden Anlagen an ein Unterseekabel.

»Die Wellenfirmen haben das Blaue vom Himmel versprochen, um Investoren an Land zu ziehen – und die Entscheidungsträger haben ihnen geglaubt«, erinnert sich Neumann. Heute gebe sich die portugiesische Regierung weniger euphorisch, zumal das hoch verschuldete Land zurzeit ganz andere Probleme habe. Neumann: »Die Meeresenergie ist auf deren Agenda weit nach hinten gerutscht.«

Anders sieht das in Großbritannien aus. Hier hat der Staat 2009 über 80 Millionen Pfund in die Entwicklung von Meeresenergietechnologien investiert. Bis 2020 sollen sie zusammen 2000 Megawatt bereitstellen – immerhin so viel wie zwei Atomkraftwerke. 2050 könnte bis zu einem Fünftel des britischen Stroms aus dem Meer kommen, schätzt eine Studie des Carbon Trust Funds.

Auf den Britischen Inseln hat auch die Seeschlange ein neues Zuhause gefunden. Im Gegensatz zu dem Seemonster von Loch Ness kann die »Pelamis« vor den Orkneyinseln an Schottlands Nordküste jeder sehen. Dort entstand in den letzten Jahren der weltweit größte Testpark für Meeresenergien. Etwa ein Dutzend Projekte in verschiedenen Entwicklungsstadien werden derzeit rund um die Inselkette aufgebaut. Gleich zwei Prototypen der »Pelamis«-Anlage wurden dort in den letzten zwei Jahren zu See gelassen, bis Ende des Jahrzehnts sollen bis zu 66 weitere folgen. 50 Megawatt könnten die Seeschlangen dann insgesamt ins Netz speisen. Es ist bisher eines der wenigen Meeresenergieprojekte, das ein großer Energiekonzern für sich gewinnen konnte: Unter der Schirmherrschaft von E.ON und der britischen Firma ScottishPower Renewables sollen die zwei Prototypen bewei-



Das Prinzip des britischen Kraftwerks »SeaGen«: Die Doppelflügel an jedem Turm werden von den Gezeiten angetrieben. Kleines Bild: der Prototyp »Seaflow«

ILLUSTRATION UND FOTO: MARINE CURRENT TURBINES LTD.

sen, dass sie auch Monsterwellen überstehen, die in den Wintermonaten vor der schottischen Küste toben und bisher als Haupthindernis für den Einsatz der Seeschlange gelten.

Auch sonst mangelt es bei den Orkneyinseln nicht an originellen Ideen, wie man sich das Meer untertan machen könnte. So soll eine riesige muschelartige Konstruktion auf dem Meeresgrund die Klappbewegung eines Schwimmkörpers in hydraulische Energie umwandeln – als Investor ist der Schweizer Elektronikgigant ABB mit an Bord. Eine finnische Firma will einen pinguinförmigen, 1600 Tonnen schweren Schiffsrumpf verankern, der wegen seiner speziellen Form von den Wellen im Kreis gedreht wird und die Rotationsenergie in eine Leistung von bis zu einem Megawatt umwandelt. Und ein weiteres Unternehmen will ab 2012 mehrere Bojen installieren, deren Wippbewegung Pumpen auf dem Meeresgrund antreibt. Aus dem derart ans Ufer gepumpten Wasser könnte neben Strom auch Trinkwasser gewonnen werden, wirbt der Betreiber – vorausgesetzt man installiere zusätzlich eine Entsalzungsanlage.

In Norwegen experimentiert ein kleiner Prototyp derweil mit einem Verfahren, das nach dem umgekehrten Prinzip funktioniert: In einem Osmosekraftwerk soll der Druck, den Trinkwasser durch eine Membran auf Salzwasser ausübt, zum Antrieb einer Turbine genutzt werden. Und in Äquatornähe sollen seit geraumer Zeit die Temperaturunterschiede zwischen dem Wasser an der Oberfläche und kühlem Tiefenwasser zum Antrieb einer Wärmekraftmaschine verwendet werden. Der Konzern Lockheed Martin will in den kommenden Jahren auf Hawaii eine Versuchsanlage errichten.

Ein noch spektakuläreres Vorhaben könnte dagegen bald vor der Westküste von Wales realisiert werden. Dort soll ein 300 Meter breiter und 33 000 Tonnen schwerer »Wave Dragon« die Wellen des Meeres bändigen und so 3000 Haushalte mit Strom versorgen. Ein um den Faktor 4,5 kleinerer, von privaten Investoren bezahlter »Wellendrache« wurde bereits von 2003 bis 2009 in der dänischen Bucht von Nissum Bredning getestet. Der für 20 Kilowatt ausgelegte Prototyp war so konstruiert, dass Wasser über eine Rampe in sein Inneres schwappen konnte, wo es beim Rückfluss ins Meer Turbinen antrieb. Probleme blieben nicht aus, obwohl das Meer in der fast komplett von Wasser umschlossenen Bucht von Nissum Bredning als ausgesprochen zahm gilt. 2005 riss sich der Testdrache von der Ankerkette los und driftete ans Ufer. Auch lösten sich bei stärkerem Wellengang häufiger die »Flügel« *(Wave Reflector)* des Drachen. Daneben hatten die Turbinen ständig mit Algen und Korrosion zu kämpfen. Insgesamt habe man jedoch alle technischen Probleme lösen können und so die Seetauglichkeit des Drachens bewiesen, urteilen die beteiligten Ingenieure in ihrem Abschlussbericht. Dennoch fand sich auch hier bislang kein Investor, der den Monsterdrachen vor Wales zu Wasser lassen möchte.

BEIDE FOTOS: VOITH HYDRO

Auf der britischen Insel Islay treiben Wellen die Turbinen der Testanlage »Limpet« (Napfschnecke) an.

»Es wird spektakuläre Fehlschläge geben«

Allgemein schätzen Experten, dass nur wenige der Wellenenergieprototypen den Sprung zur Marktreife schaffen werden. »Von den verschiedenen Projekten werden viele unwirtschaftlich bleiben oder nicht zuverlässig arbeiten«, schreibt Tom Thorpe in einem 2010 erschienenen Bericht für den Weltenergierat. Das gelte auch für einige der Projekte, die bereits Investoren gefunden haben. »In den nächsten Jahren wird es einige spektakuläre Fehlschläge geben«, prognostiziert der britische Meeresenergieexperte.

Schuld könnte der unberechenbare Ozean sein. So steigt die Energie der Wellen quadratisch mit ihrer Höhe. Wird also eine Anlage in einem Gebiet betrieben, wo die Wellen in der Regel einen Meter hoch sind, aber einmal im Jahr zehn Meter hohe Sturmwellen über das Meer ziehen, muss das Gerät das 100-Fache seiner Normalbelastung aushalten. Anders als Schiffe, die in den Hafen fahren können, und Bohrinseln, die 30 Meter über der Meeresoberfläche gebaut sind, bekommen Wellenkraftwerke die volle Wucht der Naturgewalten ab.

Dessen war man sich auch beim deutschen Wasserkraftspezialisten Voith Hydro bewusst, als man vor Jahren einen Einstieg in die Wellenenergiebranche diskutierte. »Wir haben eine Technologie gesucht, die wirklich risikoarm ist«, sagt Jochen Weilepp, Leiter des Bereichs Ocean Energies des Heidesheimer Unternehmens. Fündig wurden Weilepp und seine Kollegen schließlich am Strand der Insel Islay vor der Westküste Schottlands. Dort betrieb das schottische Start-up-Unternehmen Wavegen seit 2001 ein kleines Kraftwerk nach dem Prinzip der oszillierenden Wassersäule, wie jenes auf der Azoreninsel Pico. Bis Voith Hydro einstieg, sah es auf Islay nicht viel besser aus: »Limpet« – englisch für Napfschnecke – machte seinem Namen alle Ehre. Das Kraftwerk war für 500 Kilowatt ausgelegt, lieferte jedoch durchschnittlich weniger als fünf Prozent dieser Leistung. Der Grund: Der Meeresboden vor der Küste war deutlich flacher als erwartet, weswegen weniger Wellen die Anlage erreichten als vorgesehen.

Voith Hydro wandelte »Limpet« kurzerhand in einen Teststand um. In über 70 000 Betriebsstunden wurden dort seitdem mehrere Turbinentypen getestet und optimiert. Sie sind in die Planung eines Wellenkraftwerks im spanischen Mutriku eingeflossen, das im Sommer 2011 in Betrieb ging. In die neue Hafenmauer des baskischen Fischerdorfs wurden

16 besonders kleine, wenig störanfällige Turbinen integriert, die auch in dem gemäßigten Wellenklima in der Bucht von Mutriku gut ausgelastet werden – und so bessere Leistung erbringen dürften als alle Kraftwerke mit der oszillierenden Wassersäule zuvor. Die 300-Kilowatt-Anlage, die 2,3 Millionen Euro gekostet haben soll, wird 600 der 5000 Einwohner Mutrikus mit Elektrizität versorgen.

Das Nachfolgeprojekt könnte dann mit größeren Turbinen und in rauerem Meeresklima vor der Isle of Lewis an der Westküste Schottlands entstehen. »Siadar« soll mitten im Meer stehen und nur durch einen 200 Meter langen Steg mit dem Ufer verbunden sein. Vier Megawatt ließen sich damit bereitstellen. Vor einem halben Jahr sah es noch gut aus für das 35-Millionen-Euro-Projekt und damit für die oszillierende Wassersäule: Eine Tochterfirma des Energiekonzerns RWE wollte den Löwenanteil der Gelder aufbringen. Aber im August 2011 bekam der Essener Stromgigant kalte Füße und zog sich aus dem Projekt zurück. Dabei stand »Siadar« eigentlich nichts mehr im Weg: »Als erstes Großprojekt dieser Art hat das ›Siadar‹-Projekt die Genehmigung der schottischen Behörden erhalten«, erläutert Weilepp.

Aber die Tochter des Essener Konzerns investiert künftig lieber in eine andere Form der Meeresenergie: in die der Gezeiten. Die Anziehung von Mond und Sonne im Zusammenspiel mit den Fliehkräften der sich drehenden Erde zerren beständig am Wasser der Weltmeere. Besonders starke Tiden strömen durch Meeresengen und in Buchten im Nordatlantik und vor der Westküste Kanadas. In Europa soll es 106 mögliche Standorte geben.

Eine Großanlage steht bereits seit den 1960er Jahren im bretonischen Saint-Malo. Dort drücken die Gezeiten täglich über 700 Milliarden Liter Wasser in die Mündungsbucht der Rance. Ein 75 Meter breiter Damm lässt die Wassermassen nur dann ins Meer zurückfließen, wenn sie dabei 24 Turbinen antreiben. Der erzeugte Strom versorgt knapp 40 000 Haushalte. Das Potenzial der Tidenenergie in Europa entspricht zwar nur einem Zehntel der erschließbaren Wellenenergie. Aber die Gezeitenkraft hat einen entscheidenden Vorteil: »Die Tidenströme sind sehr regelmäßig, und man kann sie exakt prognostizieren«, sagt Jochen Bard, Meeres-

energieexperte vom Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) in Kassel. Selbst bei einer Springflut steige die Flussgeschwindigkeit im Wasser nur geringfügig an, und wenn es doch einmal zu viel würde, ließe sich eine Anlage jederzeit abschalten. Das senke das Investitionsrisiko erheblich: »Die Überlebenschancen einer Gezeitenanlage sind viel höher als die eines Wellenkraftwerks«, meint Bard. Zudem erlaube die Vorhersagbarkeit der Gezeiten, Ausfälle einer Anlage durch Anlagen an anderen Standorten aufzufangen.

Nähern sich Robben, schaltet sich die Anlage ab

Bard war an dem Pilotprojekt »SeaGen« beteiligt, das seit 2008 in der Meeresenge zwischen dem Atlantik und dem irischen Inlandsee Stranford Lough betrieben wird. Anders als in Saint-Malo werden hier Meeresströmungen genutzt, die von den Gezeiten in Gang gesetzt werden. An einem 40 Meter hohen Turm sind unter der Wasseroberfläche zwei 16 Meter große Rotoren befestigt, die bis zu 1,2 Megawatt Leistung erbringen können, wenn Ebbe und Flut das Wasser in Bewegung setzen. Auch bei SeaGen gab es zunächst technische Probleme, etwa defekte Rotorblätter. »Seit diese Kinderkrankheiten überwunden sind, arbeitet SeaGen aber sehr zuverlässig«, sagt Bard. Wenn etwas nicht so läuft, wie es soll, wird der Aufwand jedoch gleich sehr hoch. Dann müssen die Zwillingsrotoren am Turm über die Wasseroberfläche gefahren und Reparaturen vor Ort durchgeführt werden. Diesen Kostenfaktor will ein ähnliches Projekt vor Südkoreas Südküste minimieren: Dort soll in den nächsten Jahren eine Farm verhältnismäßig einfacher, aber robuster Unterwasserrotoren installiert werden, die 100 000 Haushalte mit Strom versorgen können.

Die Betreiber haben in Südkorea wohl mit weniger strengen Umweltauflagen zu kämpfen als beim britischen Gezeitenkraftwerk SeaGen. Dort wurde extra ein Sonargerät angebracht, das nach Robben Ausschau hält – kommt eines der Tiere den Rotoren zu nahe, schaltet sich die Anlage ab. Daneben wurden Studien zum Einfluss der Anlage auf die Flora und Fauna des Meeresgrundes durchgeführt.

Bei zukünftigen Gezeitenkraftwerken wollen Betreiber auf jeden Fall vermeiden, dass sie – wie der Damm von Saint-Malo – das Ökosystem im Meer auf den Kopf stellen. Der Umweltschutz dominierte auch die Debatte um die Pläne, ein riesiges Gezeitenkraftwerk in der Bucht des Severn bei Bristol zu bauen. Dazu wäre ein 16 Kilometer langer Damm nötig, in dem 216 gewaltige Turbinen den 14 Meter messenden Tidenhub nutzen. Fünf Prozent des englischen Elektrizitätsbedarfs würde das Projekt decken. Aber da der »Severn Barrage« die natürliche Umgebung von Fischen und Vögeln gestört hätte und zudem eine Machbarkeitsstudie überraschend hohe Kosten von mindestens 34 Milliarden Pfund errechnete, legte die Regierung das Projekt vergangenes Jahr auf Eis – vorerst.

Auch sonst scheint die Zukunft der Meeresenergie vor allem eine Frage des Geldes zu sein. Denn ob das Meer auf lange Sicht preislich mit dem Strom aus Wind oder Biomasse konkurrieren kann, muss sich erst noch zeigen. Momentan sind die Investitionskosten sehr hoch: zehn Millionen Euro für jedes installierte Megawatt Leistung. In zehn Jahren, so erwartet Bard, könnten die Investitionskosten für größere Projekte auf ein Drittel sinken. Damit läge man dann im Bereich der Offshore-Windenergie.

Die Konkurrenz der verschiedenen Projekte um Fördergelder wird womöglich dazu beitragen, dass sich jene Konzepte durchsetzen, die am billigsten Strom produzieren können. Das werden mehrere sein, prognostiziert Jochen Bard: »Bei der Meeresenergie wird es nicht so sein wie beim Wind, wo der Dreiblattrotor alle anderen Ansätze verdrängt hat.« Bis zur Marktreife muss die Meeresenergie aber noch einige Hürden nehmen, meint Frank Neumann: »Erst mal müssen ein oder zwei Technologien einen ganzen Winter ohne Schäden betrieben werden.«

MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de

Unser Online-Dossier »Energie« finden Sie unter
www.spektrum.de/energie

DER AUTOR

Robert Gast ist Diplomphysiker und Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

QUELLEN

Barros, N. et al.: World Energy Council: Survey of Energy Resources. 2010

Barros, N. et al.: Carbon Emission from Hydroelectric Reservoirs Linked to Reservoir Age and Latitude. In: Nature Geoscience 4, S. 593–596, 2011

Intergovernmental Panel on Climate Change: Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Mai 2011

Sachverständigenrat für Umweltfragen: 100 Prozent erneuerbare Stromversorgung bis 2050: klimaverträglich, sicher, bezahlbar. Mai 2010

WEBLINKS

www.erneuerbare-energien.de
Informationen des BMU zu erneuerbaren Energien
http://ec.europa.eu/research/energy/eu/research/hydropower/index_en.htm
Forschungsprogramm der EU zur Energie aus Wasser
www.ipp.mpg.de/ippcms/ep/ausgaben/ep200302/bilder/0203_wavedragon2_dia.html
Bilder des »Wave Dragon«

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1135754

Ringwallspeicher für die Energiewende

Traditionelle Pumpspeicherkraftwerke eignen sich ideal zum Ausgleich von zeitweise auftretenden Überschüssen und Defiziten bei der Stromerzeugung. Allerdings gibt es nur wenige Standorte, die dafür in Frage kommen und sich konfliktarm erschließen lassen. Eine flexiblere, wirtschaftliche Alternative bilden so genannte Ringwallspeicher.

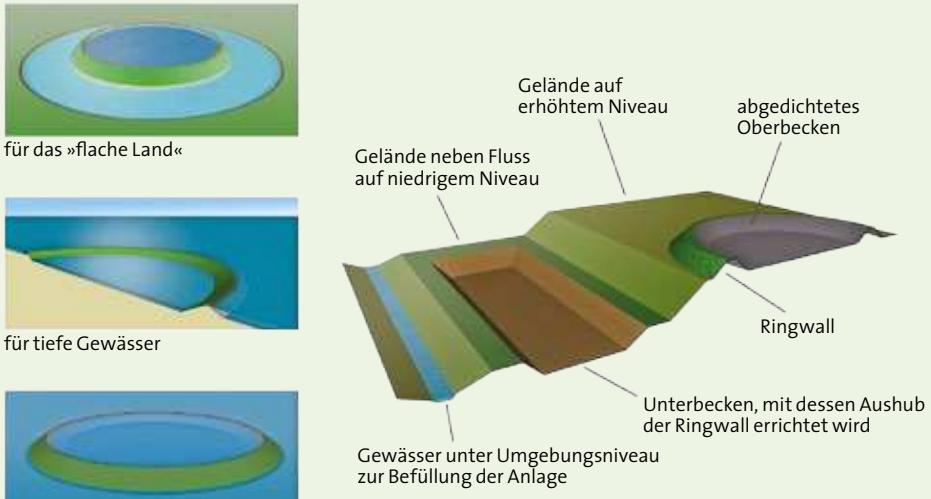
Von Matthias Popp

Prinzipiell ließe sich der Energieverbrauch aller Menschen auf der Erde problemlos durch Sonne und Wind decken (siehe die ersten beiden Beiträge der Serie in SdW 12/2011, S. 68, und 1/2012, S. 78). Das Problem: Beide Energiequellen sind »volatil«, stehen also wetterabhängig in zeitlich sehr schwankendem Umfang zur Verfügung. Erzeugung und Nachfrage weichen daher dauernd voneinander ab.

Eine stabile Stromversorgung funktioniert aber nur bei einem präzise ausbalancierten Gleichgewicht von Produktion und Verbrauch. Um Beschädigungen oder Ausfälle im Stromnetz zu vermeiden, müssen demnach zeitweilig auftretende Überschüsse zwischengespeichert werden, so dass Mangelphasen überbrückt werden können.

Der benötigte Speicher, um in Deutschland jederzeit, auch über die größten zu erwartenden Flauten hinweg, die Nachfrage befriedigen zu können, wird in so genannten Tagesladungen angegeben (siehe Grafik S. 86). Eine Tagesladung reicht aus, um allein per Speicher die Vollversorgung für einen Tag mit der im Langzeitdurchschnitt zu erwartenden Stromnachfrage zu gewährleisten. Berechnet man Szenarien technisch realisierbarer, zu 100 Prozent regenerativer Stromversorgungssysteme auf Basis von Wind und Sonne, zeigt sich, dass der Speicherbedarf erheblich davon abhängt, wie sich der Erzeugungspark zusammensetzt, mit dem die Energie aus natürlichen Kreisläufen in Elektrizität umgewandelt wird.

Den größten Vorratsbedarf hätte mit über 100 Tagesladungen eine reine Versorgung mit Solarenergie. Denn im Winter scheint die Sonne geringer, zugleich wird in der kalten Jahreszeit mehr Strom verbraucht. Bei Windrädern hängt der Speicherbedarf zum Ausgleich der Volatilität wesentlich von der technischen Auslegung ab. Starkwindphasen und Sturmböen erreichen gewaltige Leistungsspitzen, daher werden die Rotoren bei höheren Windgeschwindigkeiten zunehmend in den Wind gedreht, um die Anlagen nicht zu überlas-



MATTHIAS POPP

Was braucht es, um einen Ringwallspeicher zu bauen? Die Grafik zeigt, wie solche Bauwerke in der Ebene (links oben), im tiefen oder flachen Wasser (links, Mitte und unten) oder in der Nähe eines Flusses (rechts) entstehen können.

LINKS: MATTHIAS POPP / GRAFIK: STEFAN SCHIESSL; UNTEN: MATTHIAS POPP / WOLFGANG SCHWARZ

Visionen für eine Zukunft, die verstärkt auf Wasser- und Windkraft setzt: ein Ringwallspeicher-Hybridkraftwerk, 6,6 Kilometer im Durchmesser und 215 Meter hoch. Es lässt sich wie hier dargestellt in einen See einbetten, der als Unterbecken dient, und mit Windanlagen kombinieren. Der Flächenverbrauch solcher Anlagen entspricht in etwa dem großer Braunkohletagebaugebiete wie hier im tschechischen Sokolov (kleines Bild).

ten. Über die Windgeschwindigkeit, ab der diese Reduzierung der abgenommenen Leistung einsetzt, wird die Nennleistung einer Windenergieanlage festgelegt. Je höher diese Abregelungswindgeschwindigkeit gewählt wird, desto seltener wird die Nennleistung erreicht, desto weniger Volllaststunden werden erzielt und desto mehr sinkt auch der Benutzungsgrad der Anlagen. Alle Windenergieanlagen Deutschlands zusammen erreichten 2011 einen mittleren Benutzungsgrad von rund 20 Prozent, entsprechend etwa 1750 Volllaststunden bei 8760 Jahresstunden.

Dadurch müssten bei einem wachsenden Anteil der Windenergie zur Übernahme einer wesentlichen Versorgungslast das Übertragungsnetz und die Speicher in Starkwindphasen fünfmal mehr Leistung transportieren und aufnehmen können als für die Versorgung der Verbraucher nötig. In den von mir am Institut für Wärme- und Brennstofftechnik der Technischen Universität Braunschweig berechneten Szenarien wurde deshalb auch analysiert, wie sich ein wesentlich höherer Benutzungsgrad auf den weiteren Ausbau der Windenergie auswirken würde. Bei einer Vollversorgung mit Windenergieanlagen mit ungefähr 50 Prozent Benutzungsgrad würde der Speicherbedarf etwa 40 Tagesladungen erfordern. Da der Wind besonders stark während des Winterhalbjahres bläst, könnten die Speicher Erzeugungsüberschüsse aus dem Winter in den Sommer übertragen – also gerade umgekehrt wie bei der Solarenergie. Entsprechend liegt es nahe, diese beiden Erzeugungsformen zu kombinieren.

Werden regional Solarenergie und Windenergie aufeinander abgestimmt, lässt sich der Speicherbedarf in Deutschland auf rund 14 Tagesladungen reduzieren. Der Erzeugungsanteil der Windenergie müsste dabei zirka 80 Prozent, der von Solarenergie 20 Prozent betragen. Bei dieser optimiert kombinierten Erzeugung aus Wind und Sonne würden die Speicher selten und hauptsächlich im Winter in größerem

Umfang in Anspruch genommen. In der übrigen Zeit wären die Speicher gut gefüllt und würden mit nur einem kleinen Teil ihrer Kapazität die kurzzeitigen Differenzen zwischen Erzeugung und Nachfrage ausgleichen. Starken Einfluss auf den Speicherbedarf hat die Erzeugungsreserve. Je mehr Leistung oberhalb des Durchschnittsverbrauchs vorgehalten wird, desto weniger werden die Speicher in Anspruch genommen und desto schneller werden sie nach einer Entnahme wieder gefüllt. 80 Prozent Erzeugungsreserve würden in Deutschland bei vorteilhafter Kombination von Wind und Sonne einen Speicherbedarf von deutlich unter zehn Tagesladungen erfordern.

Flexiblere Standortsuche für die Wasserspeicher

Besonders günstig ist es, wenn man über Speicher mit möglichst hohem Wirkungsgrad verfügt. Damit ließe sich die Erzeugungsreserve, also die Anzahl der erforderlichen Wind- und Solarenergieanlagen, die über den realen Verbrauch hinaus vorgehalten werden müssen, um Verluste auszugleichen, deutlich senken. Wirkungsgrade von 80 Prozent und Kapazitäten in der schon erwähnten Größenordnung lassen sich grundsätzlich mit Pumpspeichern erzielen. Doch liegt der Speicherbedarf für Deutschland selbst unter günstigsten Annahmen über dem Mehrhundertfachen der heute verfügbaren Pumpspeicherkapazität von rund 40 Gigawattstunden. Für den Bau so vieler weiterer Wasserbecken für klassische Pumpspeichersysteme sind geeignete Gebiete selten.

Diese Probleme ließen sich mit Ringwallspeichern umgehen: Wasserspeichersysteme, deren Oberbecken ein aufgeschütteter Ringwall bildet, der mit dem Aushub für das Unterbecken errichtet wird. Sie funktionieren im Prinzip wie Pumpspeicher. Es lassen sich aber leichter geeignete Standorte finden. Ihre potenziellen Vorteile sind beträchtlich:

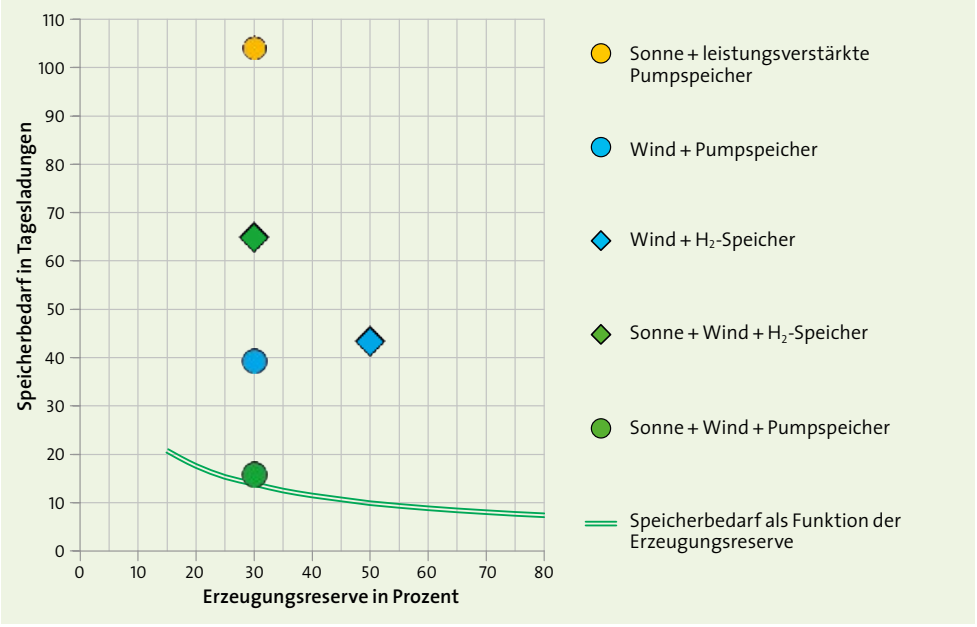
➤ Anders als bei Pumpspeichern kann man bei Ringwallspeichern auf eine Flutung großer Flusstäler verzichten.

➤ Es müssen nicht unbedingt hohe Berge in unmittelbarer Nähe der Wasserreservoirs stehen. Vielmehr wird der Aushub für das Unterbecken dazu benutzt, den Höhenunterschied und die Einfassung für das Oberbecken künstlich herzustellen. Mit dem Ringwall wird der Höhenunterschied im flachen Land geschaffen oder bei geringen natürlichen Höhenunterschieden verstärkt.

➤ Damit lassen sich sehr große Kapazitäten erreichen, die das Speicherproblem der volatilen erneuerbaren Energien mit hohen Wirkungsgraden lösen könnten.

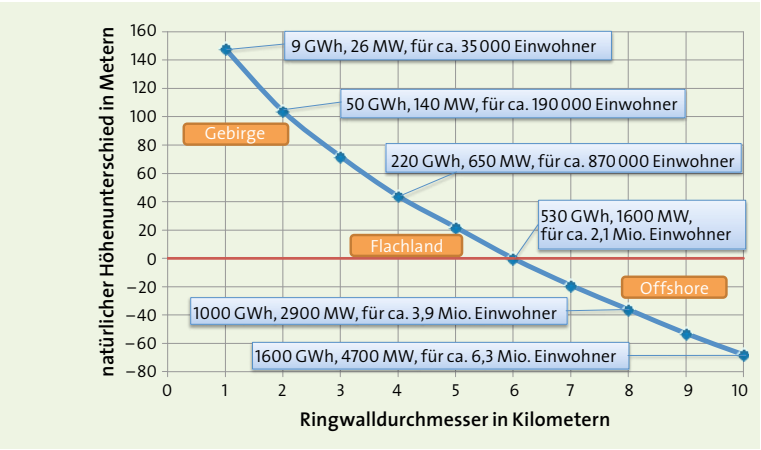
Für einen Ringwallspeicher würde – ähnlich wie beim Abtrag der Deckschichten eines Braunkohletagebaus – das Unterbecken ausgehoben. Aus dem Erdaushub errichtet man einen stabilen Ringwall für das Oberbecken. Dieses wird dann auf seiner Innenseite abgedichtet und durch Druckleitungen über ein Wasserkraftwerk mit dem Unterbecken verbunden. Stromüberschüsse treiben im Kraftwerk Motoren an, die über Pumpen das Wasser vom Unter- in das Oberbecken befördern. Bei Stromdefiziten wird dieses Wasser unter hohem Druck über Turbinen aus dem Oberbecken in das Unterbecken zurückströmen und dabei Generatoren antreiben.

Berechnungen zeigen, dass die Erdarbeiten für einen Ringwallspeicher pro Kilowattstunde Speicherkapazität einen Aufwand erfordern, der dem von Pumpspeichern in Mittelgebirgen entspricht. Sind in einer Region natürliche Höhenunterschiede vorhanden, lassen sich mit dem Prinzip der Ringwallspeicher auch kleinere Systeme als auf dem flachen Land bei gleicher Wirtschaftlichkeit realisieren (siehe Grafik rechts). Das Unterbecken braucht den Ringwall nicht zu umschließen, sondern kann in seiner Form frei gestaltet werden. Siedlungen und sonstige sensible Landschaftsbereiche können umgangen und in die Wasserlandschaft integriert werden. Für die Dimensionen einer derartigen Anlage gilt folgender Zusammenhang: Verdoppeln sich Durchmesser, Höhe sowie das vorgesehene Pegelspiel in Ober- und Un-



MATTHIAS POPP

Wie viel Speicher braucht man, um Strom ausschließlich regenerativ zu erzeugen? Der Grafik sind diese Wirkungsgrade zu Grunde gelegt: Pumpspeicher: 80 Prozent, Wasserstoff(H_2)-Speicher: 40 Prozent.



MATTHIAS POPP

Der Durchmesser von vergleichbaren Ringwällen variiert mit den natürlichen Höhenunterschieden. Angenommen sind hier 200 Meter mittlere Höhendifferenz der Wasserspiegel und dass der Pegel 20 Meter im Unter- und 50 Meter im Oberbecken schwankt.

terbecken, dann wächst der Energieinhalt auf das 16-Fache. Die Grafik auf S. 85 stellt eine – idealisiert kreisförmige – Ringwallanlage vor. Der Außendurchmesser des Ringwalls beträgt 6,6 Kilometer. Der Ringwall ist 215 Meter hoch und am Wallfuß etwa 700 Meter breit. Der äußere Wasserring für das Unterbecken hat einen Durchmesser von rund elf Kilometern. Etwa 2000 große Windenergieanlagen würden, kombiniert mit der entsprechenden Fläche für Fotovoltaikpaneele, die ohne zusätzlichen Landverbrauch über der Wasserfläche des Speichers angebracht sind, die Energie liefern. Das Gesamtsystem würde im Mittel mit zwei Gigawatt und mit maximal 3,2 Gigawatt Leistung die Stromversorgung für zirka 2,6 Millionen Einwohner sicherstellen und könnte zwei Kernkraftwerke ersetzen.

Die beispielhaft illustrierte Anlage vereinigt die Funktionen von Energiegewinnung und -speicherung, weshalb Fachleute von einem Hybridkraftwerk sprechen. Rund 30 solcher Anlagen würden rein rechnerisch ausreichen, um Deutschland versorgungssicher mit regenerativem Strom allein aus Wind und Sonne zu versorgen (siehe Grafik links). Ein Rückgriff auf fossile und nukleare Energieträger zur Stromerzeugung könnte entfallen. Entsprechend würden keine Kosten für den Einkauf von Energierohstoffen anfallen.

Die angedachte Dammhöhe solcher Ringwälle mag auf den ersten Blick ehrgeizig erscheinen, doch liegt sie unter jener des Nurek-Staudamms, der 1980 in Tadschikistan fertig gestellt wurde und mit 300 Metern das derzeit weltweit höchste Stauwerk darstellt. Wegen der Erdbebengefahr im dortigen Gebiet wurde er nicht aus Beton, sondern als Erdbauwerk ausgeführt. Wie viele andere große Stauseen auch speichert der Nurek-Damm ein Mehrfaches an Wasser im Vergleich zum hier vorgestellten Ringwallspeicher.

Konventionelle Pumpspeicher wälzen als Kurzzeitspeicher ihre Kapazität im Tagesrhythmus oder in noch kleineren Zeitabständen um. Im Gegensatz dazu würden die Pegel in einem auch für den Langzeitausgleich konzipierten Ringwallspeicher im Normalbetrieb nur geringe Schwankungen aufweisen. Der Speicher wäre meistens gefüllt, die Wasserhöhe würde gerade im Sommer wenig variieren. Nur alle paar Jahre, in besonders windschwachen Wintern, wäre mit größeren Entladungen zu rechnen. Der Pegelverlauf im Unterbecken wäre deshalb vergleichbar mit den Verhältnissen an einem Fluss, der ab und zu einmal von einem Hochwasser überrollt wird. Im normalen täglichen Betrieb sollte der Pegelstand nur im Zentimeterbereich schwanken und bei der Freizeitnutzung des Unterbeckens kaum auffallen.

Regenerative Stromversorgungssysteme mit Speichern wie hier vorgestellt ließen sich europaweit vernetzen. Das würde die Versorgungssicherheit erhöhen, die Variabilität von Wind und Sonne zusätzlich ausgleichen und den Speicherkapazitätsbedarf weiter reduzieren. Man könnte die Speicher auch an der Küste errichten; dann entfiele das Unterbecken und das Meer selbst diente als Auffangbecken.

Um Deutschland mit regenerativem Strom allein aus Wind und Sonne zu versorgen, benötigte man mit diesem Konzept eine Windenergieanlage pro 1300 Einwohner sowie 20 Quadratmeter Solarmodulfläche und, je nach Systemauslegung, zirka 40 Quadratmeter Wasserfläche pro Kopf der Bevölkerung. Zusammen beanspruchten die Ringwallspeicher inklusive aller Erzeugungsanlagen nicht einmal ein Prozent der Landesfläche – weniger, als bereits heute an Biomasse für die Stromerzeugung mit Biogasanlagen angebaut wird. Letztlich handelt es sich bei dieser Zukunftsoption nicht so sehr um eine technische oder finanzielle Herausforderung als vielmehr um eine Frage der öffentlichen Diskussion und Akzeptanz durch die Bürger.

DER AUTOR

Matthias Popp studierte Maschinenbau an der Fachhochschule Coburg und machte sich später selbstständig. 1989 diplomierte er an der Technischen Universität München. 2002 bis 2008 war er Zweiter Bürgermeister seiner Heimatstadt Wunsiedel im Fichtelgebirge. 2010 promovierte er an der Technischen Universität Braunschweig über erneuerbare Energien.

QUELLE

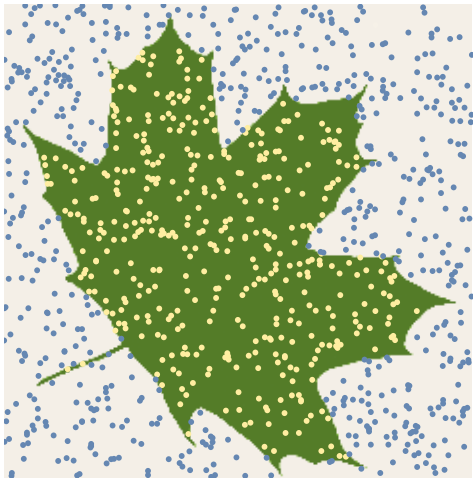
Popp, M.: Speicherbedarf bei einer Stromversorgung mit erneuerbaren Energien. Springer, Heidelberg 2010

WEBLINKS

http://de.wikipedia.org/wiki/Nurek-Staudamm
Informationen und Linksammlung über die größten Staudämme der Erde

www.ringwallspeicher.de
Analyse eines Hybridkraftwerks auf der Grundlage eines Ringwallspeichers

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1137645**



STOCHASTIK

Spiel mit dem Zufall

Zufallszahlen sind für vielerlei gut – etwa dazu, den Flächeninhalt kompliziert geformter Figuren zu ermitteln. In vielen Fällen müssen sie allerdings gar nicht wirklich zufällig sein, sondern nur so aussehen. Manchmal funktionieren sogar schlechte Imitate am besten.

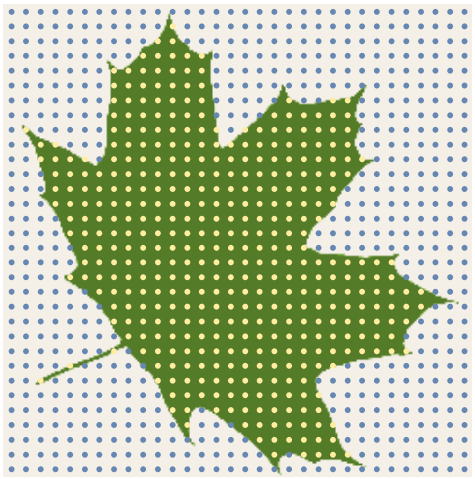
Von Brian Hayes

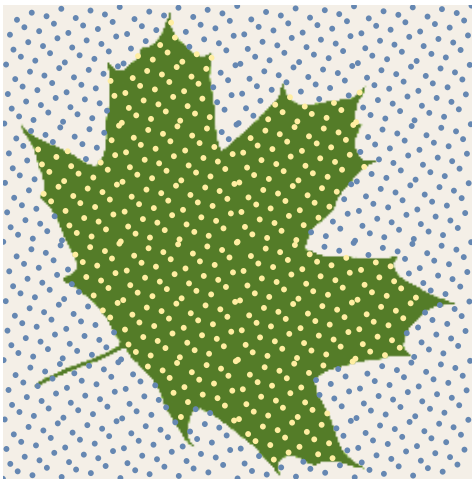
Anfang der 1990er Jahre begann Spassimir Paskov im Rahmen seiner Promotion an der Columbia University in New York ein damals neues Finanzinstrument zu analysieren: mit Hypotheken besicherte Wertpapiere (collateralized mortgage obligations, kurz CMOs), die die Investmentbank Goldman Sachs herausgab. Der Doktorand suchte nach einer Möglichkeit, anhand der zu erwartenden künftigen Zahlungsflüsse für tausende Hypotheken mit einer Laufzeit von 30 Jahren den aktuellen Wert solcher Anleihen zu kalkulieren. Dazu genügte es nicht, mit einer Standardformel Zinseszinsen zu berechnen. Hypotheken werden oft vorzeitig abgelöst, etwa beim Verkauf des betreffenden Hauses oder im Zuge einer Umschuldung. Manche Darlehen fallen wegen Zahlungsunfähigkeit des Schuldners aus. Außerdem können die Zinssätze steigen oder sinken. Der momentane Wert eines CMO entspricht dem zu erwartenden Ertrag über die gesamte Laufzeit von 30 Jahren und wird somit von insgesamt 360 ungewissen, voneinander abhängigen monatlichen Zahlungseingängen bestimmt. Mathematisch gesehen, handelt es sich folglich um eine Art Mittelwert über eine Funktion mit 360 Variablen. Paskov hätte demnach ein Integral im 360-dimensionalen Raum berechnen müssen.

Das schloss eine exakte Lösung des Problems aus. Der Doktorand und sein Betreuer Joseph Traub behalfen sich deshalb mit einem etwas undurchsichtigen Näherungsverfahren: der so genannten Quasi-Monte-Carlo-Methode. Das herkömmliche Monte-Carlo-Verfahren beruht darauf, Rückschlüsse auf den Mittelwert einer Funktion zu ziehen, indem man einige zufällig gewählte Funktionswerte stellvertretend berechnet. Die »Quasi«-Variante unterscheidet sich in der Art der Stichprobe: Sie ist nicht rein zufällig, aber auch nicht regelmäßig. Wie Paskov und Traub herausfanden, lieferten einige ihrer Quasi-Monte-Carlo-Programme erheblich genauere Ergebnisse und waren dabei sogar schneller als das traditionelle Verfahren. So lag der Wert eines CMO nicht erst nach einer mehrstündigen Berechnung vor, sondern innerhalb weniger Minuten.

Erklärt das die anschließende irrationale Euphorie auf den Finanzmärkten, den Irrsinn des bedenkenlosen Handelns mit komplexen Derivaten und seine traurigen Folgen – Krise, Kollaps, Rezession, Arbeitslosigkeit? So einfach war es leider nicht, für den Wahn gab es andere Gründe.

Auf dem Feld der Mathematik jedoch hatte das Ergebnis von Paskov und Traub sehr wohl Konsequenzen: Quasi-Monte-Carlo-Modelle kamen dadurch unverhofft zu neuem Ansehen. Nach früheren theoretischen Untersuchungen sollten sie ab 10 bis 20 Dimensionen unbrauchbar werden, also weit unterhalb der hier betrachteten 360. Der überraschende Erfolg bei den CMOs spornte die Mathematiker zur Suche nach





ALLE ILLUSTRATIONEN DES ARTIKELS: BRYAN HAYES

Den Flächeninhalt einer komplizierten Figur – hier eines Ahornblatts (ganz links) – näherungsweise zu bestimmen, gehört zu den klassischen Anwendungen der Monte-Carlo-Methode. Die grundlegende Idee besteht darin, Punkte auf einem Quadrat mit der Figur in der Mitte zu verteilen und zu zählen, wie viele davon innerhalb des Blatts liegen (gelb) und wie viele es verfehlen (blau). Das Verhältnis der Treffer zur Gesamtzahl der Punkte – hier 1024 – gibt den ungefähren Flächeninhalt der Figur an. Bei der herkömmlichen Monte-Carlo-Methode (halb links) werden die Punkte zufällig über das Quadrat verteilt. Das Gegenteil wäre eine streng deterministische Anordnung in einem regelmäßigen Gitter (halb rechts). Die Quasi-Monte-Carlo-Methode (ganz rechts) beruht auf einem Stichprobenmuster, das eine ausgewogene Verteilung der Punkte anstrebt, ohne dass diese ein zufälliges oder regelmäßiges Muster bilden. Die drei Methoden ergeben für den Flächeninhalt Näherungswerte von 0,4189, 0,4209 und 0,4141 der Quadratfläche, was durchweg weniger als ein Prozent vom tatsächlichen Wert 0,4185 abweicht.

einer Erklärung an. Vor allem erhob sich die Frage, ob die Methode auch bei anderen Problemen funktionieren könnte.

Das Beispiel illustriert die seltsam zwiespältige Rolle des Zufalls bei Berechnungen. Algorithmen sind ihrem Wesen nach streng deterministisch, viele von ihnen scheinen aber durchaus von der Möglichkeit zu profitieren, ab und zu für eine benötigte Entscheidung auch mal eine Münze zu werfen. Bei tatsächlichen Berechnungen sind die Zufallszahlen allerdings so gut wie niemals wirklich zufällig, weil ein Computer sie ermittelt. Es handelt sich also um kunstvolle Fälschungen, die zwar wie erwürfelt aussehen und sogar statistische Tests bestehen sollen, aber trotzdem aus einer deterministischen Quelle stammen. Erstaunlich daran ist, wie hervorragend diese Pseudozufallszahlen funktionieren – zumindest in der Mehrzahl der Fälle.

Mathematik mit Pfeilwürfen

Quasizufallszahlen treiben die Scharade noch einen Schritt weiter: Sie geben nicht einmal vor, zufällig zu sein. Trotzdem scheinen sie in manchen Situationen, die nach Zufall verlangen, sehr gute Ergebnisse zu liefern. Unter bestimmten Umständen – wie im Fall der CMOs – leisten sie sogar mehr als ihre pseudozufälligen Gegenstücke.

Ein simples Beispiel soll den Unterschied zwischen »pseudo« und »quasi« klarmachen. Es gelte, den Flächeninhalt einer komplizierten Figur – etwa eines Ahornblatts – zu bestimmen. Die Aufgabe lässt sich mit einem auf Zufall basierenden Trick lösen. Dazu heftet man das Blatt auf ein Stück Papier bekannter Größe und bewirft Letzeres ungezielt mit Pfeilen. Wenn von N Geschossen, die auf das Papier treffen, n innerhalb des Blatts landen, gibt der Quotient $n:N$ näherungsweise das Verhältnis der Blatt- zur Papierfläche an.

Echte Pfeile ungezielt zu werfen, ist sehr aufwändig und auch nicht ganz ungefährlich. Ersetzen wir aber Pfeile durch Punkte und überlassen deren zufällige Platzierung auf der Vergleichsfläche einem Computer, dann geht die Sache ganz einfach und dabei auch noch erstaunlich präzise.

Ich habe das Verfahren mit einem echten Ahornblatt ausprobiert. Ich setzte ein Foto von ihm in ein weißes Quadrat aus 1024 × 1024 Pixeln, auf dem ein kleines Programm zufällig – in Wirklichkeit natürlich nur pseudozufällig – 1024 Punkte verteilte. Beim ersten Versuch landeten 429 von ihnen im Blatt, was 0,4189 als Näherungswert für den Flächeninhalt lieferte. Als ich alle grünen Pixel im Feld auszählte, erhielt ich fast dasselbe Ergebnis: 0,4185. Offenbar hatte ich einen Glückstreffer gelandet. 1000 Versuche ergaben einen Mittelwert von 0,4183 mit einer Standardabweichung von 0,0153.

Je größer N, desto besser wird die Näherung. Strebt die Menge der Punkte gegen unendlich, ergibt sich als Grenzwert die tatsächliche Lösung. Dahinter steckt ein mathemati-

sches Theorem: das berühmte Gesetz der großen Zahlen. Es garantiert auch, dass eine ideale Münze in der Hälfte aller Fälle »Zahl« zeigt, sofern sie nur oft genug geworfen wird.

Das Beispiel illustriert die Grundidee des Monte-Carlo-Verfahrens. Man kleidet ein mathematisches Problem, das zu kompliziert ist, um sich exakt lösen zu lassen, so in die Form eines Glücksspiels, dass die Gewinnchance des Spielers gleich der Lösung ist. Ein Computer wiederholt das Spiel dann sehr oft für immer andere zufällig gewählte Parameter. Das gemittelte Ergebnis ist ein guter Schätzwert für die gesuchte Größe.

Der Zufall spielt dabei eine entscheidende Rolle. Das Gesetz der großen Zahlen gilt ja nur, wenn die Werte der Parameter tatsächlich zufällig gewählt werden. Beim Ahornblatt ist so gewährleistet, dass die Punkte wahllos darüber verstreut sind. Allerdings fragt sich, ob nicht auch andere Methoden, Punkte für die Stichprobe auszusuchen, denselben Zweck erfüllen würden. Schließlich könnte man die Blattfläche genauso bestimmen, indem man ein Gitter auf das Quadrat legt und die Kästchen innerhalb des Blatts zählt. Ich habe das ebenfalls probiert und dazu ein 32 × 32-Raster mit 1024 Kästchen benutzt. Für den Inhalt der Fläche ergab sich ein Näherungswert von 0,4209 – nicht ganz so gut wie bei meinem Glückstreffer mit Zufallszahlen, aber immerhin weniger als 0,6 Prozent vom tatsächlichen Wert entfernt.

Der Fluch der hohen Dimensionen

Zuletzt habe ich mit 1024 quasizufälligen Punkten die Blattfläche vermessen. Diese ergeben eine Verteilung, die irgendwo in der Mitte zwischen totalem Chaos und vollkommener Ordnung liegt. Dadurch füllen sie im zweidimensionalen Fall eine Fläche gleichmäßiger aus als echte Zufallszahlen, aber bei Weitem nicht so regelmäßig wie die Punkte eines Gitters. Berechnet werden sie mit mehr oder weniger komplizierten mathematischen Verfahren; das älteste hat schon in den 1930er Jahren der niederländische Mathematiker Johannes G. van der Corput (1890–1975) erdacht (siehe Kasten auf S. 93). Das Zählen der Treffer mit quasizufälligen Punkten ergab einen Näherungswert von 0,4141 bei einem Fehler von einem Prozent.

Jede der drei Vorgehensweisen liefert also ein zufrieden stellendes Resultat. Sind somit alle in etwa gleich gut? Im Allgemeinen nicht. Sie haben nur in diesem Fall ähnlich gut abgeschnitten, weil es ziemlich einfach ist, den Inhalt einer zweidimensionalen Figur zu bestimmen.

In höheren Dimensionen wird die Aufgabe deutlich schwieriger. Um zu verstehen, warum, betrachten wir einen Würfel mit der Kantenlänge 1 samt einem kleineren, dessen Kanten die Länge ½ haben sollen (Bild rechts). Im eindimensionalen Fall besteht ein solcher »Würfel« einfach aus einer Strecke, und sein »Volumen« entspricht deren Länge. Folglich nimmt der kleine Würfel das halbe »Volumen« des größeren ein. Bei zwei Dimensionen handelt es sich um ein Quadrat mit dem Flächeninhalt als »Volumen«. Der kleinere Würfel hat dann das »Volumen« ¼. In drei Dimensionen haben wir es mit dem uns vertrauten Würfel zu tun; das Volumen des kleineren beträgt nun ⅛. So nimmt der Unterschied im Inhalt bei höheren Dimensionen d immer weiter zu. Bei $d = 20$ ist das Volumen des kleineren »Würfels« – dessen Kanten weiterhin alle die Länge ½ haben – auf weniger als ein Millionstel geschrumpft! Der Mathematiker Richard Bellman (1920–1984) bezeichnete dieses Phänomen als »Fluch der hohen Dimensionen«.

Um im 20-dimensionalen Raum das Volumen des Ein-Millionstel-Würfels zu messen – oder ihn überhaupt nur aufzuspüren –, wären schon sehr viele Testpunkte nötig, damit zumindest einer überhaupt trifft. Ein 20-dimensionales Gitter müsste dafür aus mehr als einer Million Punkten (genauer $2^{20} = 1\,048\,576$) bestehen. Bei Zufallspunkten lassen sich nur Wahrscheinlichkeiten ermitteln, so dass es nicht möglich ist, die nötige Anzahl präzise anzugeben. Damit man aber mit wenigstens einem Treffer rechnen kann, braucht es wieder 2^{20} Punkte. Dieselbe Punktzahl ergibt sich schließlich auch bei einer quasizufälligen Verteilung. Tatsächlich spielt es kaum eine Rolle, wie man konkret vorgeht, wenn man blind nach einem Objekt vom Volumen $½\,d$ tastet; man muss auf jeden Fall an mindestens $2\,d$ Orten suchen.

Wären reale Aufgaben so schwierig wie diese, bestünde nicht die geringste Hoffnung, mit einem 360-dimensionalen Integral fertigzuwerden. Wie wir aber bereits wissen, lassen sich einige Probleme selbst dieser Größenordnung mit der Monte-Carlo-Methode erfolgreich angehen. Das dürfte daran liegen, dass die mit diesem Verfahren lösbaren Fälle über eine spezielle Struktur verfügen, durch die sich die Suche beschleunigt. Außerdem spielt offenbar auch die Art des Suchmusters eine Rolle. Dadurch lässt sich eine sinnvolle Unterscheidung zwischen den verschiedenen Auswahlverfahren treffen – von völlig chaotisch über pseudo- und quasizufällig bis hin zu streng geordnet.

Es gibt mindestens drei Eigenschaften, die Mathematiker von Zufallszahlen erwarten. Die erste ist, nicht vorhersagbar zu sein: Es darf keine feste Regel geben, nach der sie gebildet werden. Zweitens sollten sie unkorreliert, also voneinander

AUF EINEN BLICK

ERFOLG MIT PLUMPEN FÄLSCHUNGEN

1 **Monte-Carlo-Methoden** liefern mit Zufallszahlen Näherungslösungen für Probleme, die zu kompliziert sind, als dass sich ein exaktes Ergebnis berechnen ließe. Tatsächlich sind die verwendeten Zahlen aber nicht wirklich zufällig, sondern erscheinen nur so; denn sie werden nach einer festen **Rechenvorschrift** per Computer ermittelt.

2 **Quasizufallszahlen** erwecken nicht einmal mehr den Anschein von Zufälligkeit; dafür ergeben sie Muster, die eine sehr ausgewogene und trotzdem unregelmäßige Verteilung aufweisen. Dank dieser Eigenschaft liefern Quasizufallszahlen bei Monte-Carlo-Simulationen unter bestimmten Bedingungen bessere Ergebnisse als ihre echt zufälligen Gegenstücke.

3 Allerdings gilt das im Normalfall nur für Probleme, deren abstrakter **Parameterraum** nicht höher als 20-dimensional ist.

unabhängig sein. Kennt man eine Zahl, darf das nicht dabei helfen, die nächste zu erraten. Schließlich sollten keine Zahlen bevorzugt werden. Die Verteilung der Zufallszahlen muss drittens also ausgewogen sein: Wenn man den Bereich der zulässigen Werte auf beliebige Art in gleiche Gebiete unterteilt, dürfen in keinem davon besonders viele oder wenige Zufallszahlen vorkommen.

Verschiedene Arten von Zufall

Diese Anforderungen liefern hilfreiche Kriterien, um zwischen wirklich, pseudo-, quasi- und überhaupt nicht zufälligen Zahlen zu unterscheiden. Echte Zufallszahlen erfüllen alle drei Bedingungen. Sie sind unvorhersagbar, unkorreliert und ausgewogen verteilt. Bei Pseudozufallszahlen wurde die Forderung nach Unvorhersagbarkeit fallen gelassen. Sie werden nach klar bestimmten arithmetischen Regeln erzeugt; deren Kenntnis erlaubt es, die komplette Folge zu reproduzieren. Allerdings sind Pseudozufallszahlen immer noch unkorreliert und auch – zumindest annähernd – ausgewogen verteilt.

Quasizufallszahlen erfüllen noch eine Bedingung weniger. Sie sind nicht nur vorhersagbar, sondern auch abhängig voneinander. Das von ihnen gebildete Muster weist dadurch viele Regelmäßigkeiten auf, ohne jedoch so geordnet zu sein wie ein Kristallgitter. Quasizufallszahlen erfüllen damit nur noch die Forderung nach ausgewogener Verteilung.

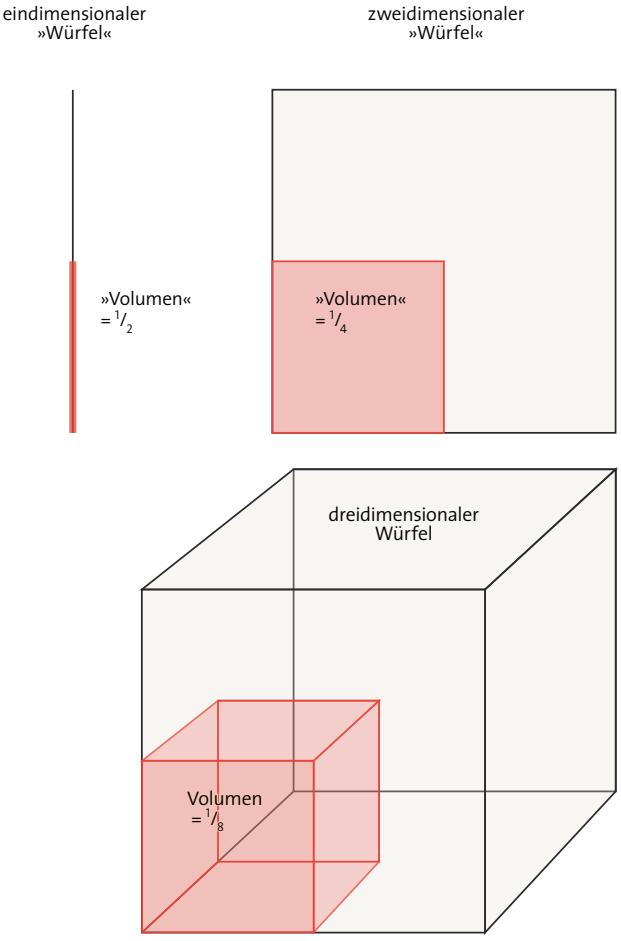
Bei einer hochgradig geordneten Zahlenmenge, die etwa die Positionen der Knoten in einem kubischen Gitter beschreibt, ist schließlich auch diese dritte Bedingung noch verletzt. Das mag zunächst verwundern. Schließlich kann man ein Gitter aus N Punkten so in N kleine Würfel zerlegen, dass jeder genau einen Punkt enthält. Aber das reicht nicht für eine ausgewogene Verteilung. Damit sie vorliegt, darf bei jeder beliebigen Unterteilung des Raums in N gleiche Bereiche jede Region nur genau einen Punkt enthalten. Das Würfelgitter erfüllt diese strenge Forderung nicht: Es lässt sich derart in achsenparallele Schichten zerlegen, dass in einigen gar kein Punkt vorkommt, wogegen andere ziemlich viele enthalten.

Jede der drei Eigenschaften von Zufälligkeit ist wichtig. Im Fall des berühmten Kasinos im realen Monte Carlo – einem Stadtteil von Monaco – kommt es in erster Linie auf Unberechenbarkeit, aber auch auf Unabhängigkeit an. Ähnlich verhält es sich bei den kryptografischen Anwendungen von Zufall. In beiden Fällen gibt es einen Gegenspieler, der alles daransetzt, jeden noch so geringen Hinweis auf Regelmäßigkeit aufzuspüren und auszunutzen.

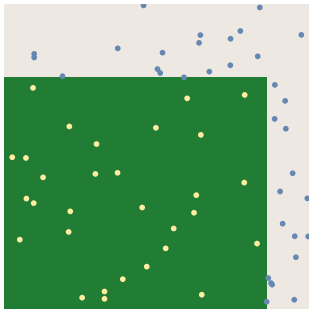
Bestimmte Computersimulationen sind sehr anfällig für Korrelationen zwischen aufeinander folgenden Zufallszahlen. Unter diesen Umständen ist die Unabhängigkeit besonders wichtig. Bei der oben durchexerzierten Volumenabschätzung steht dagegen die Ausgewogenheit der Verteilung im Vordergrund. Quasizufallszahlen schneiden hier besonders gut ab, verzichten dafür aber auf den Anschein von Unberechenbarkeit und Unabhängigkeit.

Die Ausgewogenheit einer Verteilung lässt sich über ihr Gegenstück bestimmen: die so genannte Diskrepanz. Bei einem Punktmuster innerhalb eines Quadrats zum Beispiel wählt man dazu ein in ihm enthaltenes Rechteck, dessen Seiten parallel zu den Koordinatenachsen verlaufen, und zählt die Punkte darin. Dann berechnet man anhand des Flächeninhalts, wie viele es bei vollkommen ausgewogener Verteilung sein müssten. Die maximale Differenz dieser beiden Zahlen für alle möglichen Rechtecke ist ein gebräuchliches Maß für die Diskrepanz.

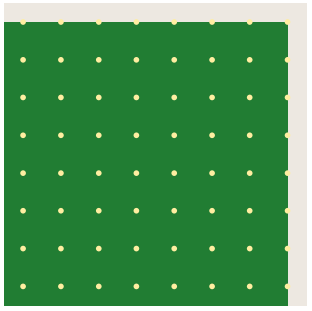
Ein anderes Maß, die so genannte Sterndiskrepanz, berücksichtigt nicht alle achsenparallelen Rechtecke, sondern nur solche, bei denen eine Ecke im Ursprung des Einheitsquadrats liegt. Diskrepanzen lassen sich aber auch mit Kreisen, Dreiecken oder anderen Figuren definieren. Nicht alle diese Maße



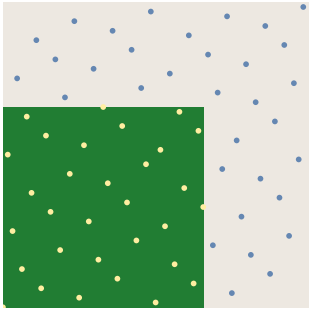
Die näherungsweise Berechnung eines Volumens wird in höheren Dimensionen immer schwieriger. Betrachten wir einen d-dimensionalen Würfel der Kantenlänge 1, der einen kleineren der Kantenlänge $^1/_2$ h enthält. Für $d = 1$ ist der »Würfel« eine Strecke und sein »Volumen« dessen Länge. In diesem Fall füllt der kleinere Würfel die Hälfte des Gesamtvolumens aus. Für $d = 2$ (ein Quadrat mit dem Flächeninhalt als »Volumen«) nimmt er nur noch $^1/_4$ und für $d = 3$ sogar lediglich ein $^1/_8$ des gesamten Volumens ein. Der Volumenanteil des kleineren Würfels schrumpft also mit $(^1/_2)^d$. Dadurch braucht es schon allein etwa 2^d Testpunkte, ihn auch nur aufzuspüren.



D* = |42,02 – 30| = 12,02



D* = |56,25 – 64| = 7,75



D* = |27,56 – 31| = 3,44

Die Diskrepanz gibt an, wie stark ein Punktmuster von einer ausgewogenen Verteilung abweicht. Die hier illustrierte Sterndiskrepanz (D*) beruht auf Rechtecken, deren eine Ecke im Koordinatenursprung liegt. Bei vollkommener Ausgewogenheit sollte der Anteil der Punkte innerhalb eines jeden solchen Rechtecks proportional zu dessen Flächeninhalt sein. Die Sterndiskrepanz des Punktmusters entspricht der Differenz zwischen diesem erwarteten und dem beobachteten Wert bei dem Rechteck, bei dem diese Abweichung am größten ist. Gezeigt ist hier das Ergebnis für drei Muster aus 64 Punkten: ein pseudozufälliges (oben), ein regelmäßiges (Mitte) und ein quasizufälliges (unten). Die quasizufälligen Punkte sind gezielt so gewählt, dass sie die Diskrepanz minimieren.

sind äquivalent, liefern also dasselbe Ergebnis. Im Übrigen fällt auf, dass das Vorgehen bei der Messung von Diskrepanzen stark demjenigen beim Monte-Carlo-Verfahren ähnelt.

Raster oder Gitter haben hohe Diskrepanzen, weil die Punkte in langen Zeilen und Spalten angeordnet sind. Ein unendlich schmales Rechteck, in dem eigentlich überhaupt keine Punkte vorkommen sollten, kann eine komplette Zeile enthalten. Mit Hilfe solcher Rechtecke, die den schlimmstmöglichen Fall darstellen, lässt sich berechnen, dass die Diskrepanz eines quadratischen Gitters mit N Punkten gleich der Wurzel aus N ist. Interessanterweise ergibt sich für die Diskrepanz eines zufälligen wie auch eines pseudozufälligen Musters genau derselbe Wert. Das heißt, für eine Million zufällig angeordneter Punkte existiert sehr wahrscheinlich mindestens ein Rechteck, in dem entweder 1000 Punkte zu viel oder zu wenig liegen.

Quasizufällige Muster sind dagegen bewusst so konstruiert, dass sie die Chance minimieren, solche Rechtecke mit stark unterschiedlichem Füllungsgrad zu finden. Dadurch lassen sich Diskrepanzen bis herab zu einem Wert von $\log N$ (zur Basis 2) erreichen, was viel kleiner als $\sqrt{N}$ ist. Für $N = 106$ beträgt die Wurzel 1000, aber der Logarithmus nur 20.

Die Diskrepanz ist ein entscheidendes Qualitätskriterium bei Monte-Carlo- und Quasi-Monte-Carlo-Simulationen. Sie bestimmt den möglichen Fehler der Berechnung, das heißt die statistische Ungenauigkeit, die für einen gegebenen Stichprobenumfang zu erwarten ist. Bei der herkömmlichen Monte-Carlo-Methode mit zufälliger Wahl nimmt mit zunehmender Punktezahl der maxiffmal zu erwartende Fehler ungefähr mit $1/\sqrt{N}$ ab. Im Fall von Quasi-Monte-Carlo-Verfahren beträgt die entsprechende »Konvergenzrate« dagegen $(\log N)^d/N$, wobei d die Raumdimension ist. Verschiedene Konstanten und andere Details sind bei den Formeln außer Acht gelassen; der Vergleich bezieht sich also nur auf Wachstumsraten und nicht auf die genauen Werte.

Gratwanderung zwischen Regelmäßigkeit und Chaos

Eine Konvergenz mit $1/\sqrt{N}$ ist quälend langsam. Damit die Genauigkeit um eine weitere Dezimalstelle steigt, müssen 100-mal so viele Punkte in die Berechnung einbezogen werden; hat sie vorher eine Stunde gedauert, braucht sie nun plötzlich vier Tage. Der Grund für das Schneckentempo ist, dass bei echter Zufallswahl unweigerlich »Klumpen« und »leere Gebiete« auftreten. Liegen zwei Punkte nahe beieinander, bedeutet das vergeudete Rechenzeit, denn dieselbe Region ist dadurch doppelt vertreten. Sind gewisse Bereiche dagegen überhaupt nicht repräsentiert, vergrößert sich der Fehler.

Diesem Nachteil steht ein Vorzug von Zufallszahlen gegenüber: Die Konvergenzrate hängt nicht von der Dimension des Raums ab. In erster Näherung ist das Programm in Dimension 100 demnach genauso schnell wie in Dimension 2. Nicht so bei der Quasi-Monte-Carlo-Methode. Ohne den Faktor $(\log N)^d$ wäre sie dem klassischen Verfahren mit Zufallszahlen deutlich überlegen, denn dann hätte sie eine Konvergenzrate von $1/N$. Eine zusätzliche Dezimalstelle an Genauigkeit würde also nur den zehnfachen Rechenaufwand erfordern! Doch leider funkt der Faktor $(\log N)^d$ ziemlich störend dazwischen; er wächst mit zunehmendem d exponentiell an. In den Dimensionen 1 und 2 ist sein Einfluss noch gering, aber schon für $d = 10$ wird $(\log N)^{10}/N$ erst kleiner als $1/\sqrt{N}$, wenn N größer als 10^{43} ist.

Es war diese allseits bekannte langsame Konvergenz in höheren Dimensionen, die den Erfolg von Paskov und Traub bei CMO-Berechnungen für $d = 360$ so frappierend erscheinen ließ. Die einzige plausible Erklärung lautet, dass die »effektive Dimension« des betreffenden Problems in Wirklichkeit viel kleiner ist als 360. Offenbar erstreckt sich das gemessene Volumen nicht über alle 360 Dimensionen des abstrakten Raums – ähnlich wie ein Blatt Papier zwar dreidimensional ist, aber nicht viel verloren geht, wenn man seine Dicke vernachlässigt.

Diese Erklärung schmälert die Leistung der beiden Mathematiker etwas: Nicht dank eines überlegenen Verfahrens hatten sie Erfolg, sondern nur, weil sich das Problem als unerwartet einfach entpuppte. Noch bemerkenswerter erscheint, dass die Methode funktionierte, obwohl gar nicht klar war,

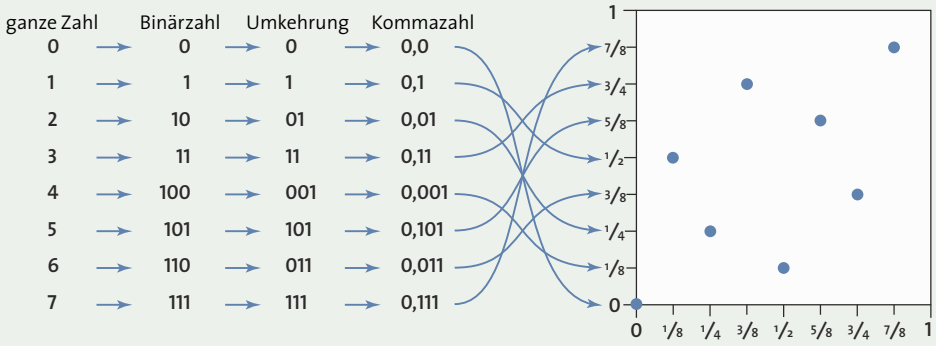
welche der 360 Dimensionen vernachlässigt wurden. Das wirkt schon ein wenig wie Zauberei.

Handelt es sich um einen bloßen Glückstreffer, so dass sich das Phänomen einer reduzierten effektiven Dimension auf eine kleine Klasse von Problemen beschränkt? Oder tritt es öfter auf? Die Antwort steht noch aus; doch gibt eine neue Idee Anlass zu Optimismus: die »Konzentration des Maßes«. Demnach sind hochdimensionale Welten überwiegend eher glatt und eben – ähnlich einem Riesenplaneten, der durch seine ungeheure Anziehungskraft die Entstehung hoher Berge verhindert, weil das zu viel Energie erfordern würde.

Die Monte-Carlo-Methode ist keine wirklich neue Idee, ebenso wenig wie ihre Quasivariante. Schon vor mehr als 100 Jahren haben Darwins Halbcousin Francis Galton (1822–1911), Lord Kelvin (1824–1907) und andere Forscher Simulationen auf der Grundlage zufälliger Stichproben ausprobiert. Diese Pioniere verwendeten noch echte Zufallszahlen – und entwickelten viel Fantasie bei deren Erzeugung. Die Monte-Carlo-Methode als solche wurde kurz nach dem Ende des Zweiten Weltkriegs im Los Alamos National Laboratory entdeckt und erhielt dort auch ihren Namen – nicht ohne Grund. Die Wissenschaftler an dieser Forschungseinrichtung in New Mexico mussten gewaltige Probleme lösen, die teils noch beängstigender waren als CMOs, und konnten dabei auf die ersten Digitalcomputer wie ENIAC und MANIAC zurückgreifen, deren Rechenleistung allerdings weit unter der heutiger Taschenrechner lag. Es handelte sich um ein verschworenes Häuflein kreativer Problemlöser wie Stanisław Ulam (1909–1984), John von Neumann (1903–1957), Nicholas Metropolis (1915–1999) und Marshall Rosenbluth (1927–2003).

Von Beginn an stützte die Los-Alamos-Gruppe ihre Untersuchungen auf Pseudozufallszahlen. »Wer arithmetische Methoden zur Erzeugung von Zufallszahlen einsetzt, versündigt sich natürlich«, verkündete von Neumann auf der ersten

Ein Rezept für Quasizufallszahlen



Verfahren für die Konstruktion von Mustern mit möglichst geringer Diskrepanz – Abweichung von der gleichmäßigen Punktverteilung – waren schon vor der Entdeckung der Quasi-Monte-Carlo-Methode bekannt. In den 1930er Jahren fragte sich der niederländische Mathematiker Johannes G. van der Corput, ob sich eine unendliche Folge verschiedener Zahlen nacheinander so im Einheitsintervall (der Menge aller Zahlen zwischen 0 und 1) anordnen ließe, dass ihre Diskrepanz proportional zu $1/N$ oder sogar noch schneller gegen null geht. Die Antwort lautet Nein, wie Corputs Kollegin Tatjana van Aardenne-Ehrenfest (1905–1984) ein Jahrzehnt später bewies. Dennoch war die Arbeit des niederländischen Mathematikers Auslöser für die Konstruktion einer ganzen Familie quasizufälliger Punktmengen und -folgen mit geringer Diskrepanz. Dabei werden Zahlen (das heißt mathematische Größen) mit Ziffernfolgen (also ihrer Darstellung) kombiniert.

Die grundlegende Idee ist, eine ganze Zahl zu nehmen, ihre Ziffernfolge umzukehren, dann eine Null mit Komma davorzusetzen und das Ergebnis als Dezimalzahl zwischen 0 und 1 anzusehen. Dieses Verfahren lässt sich mit einer beliebigen Basis für das Zahlensystem ausführen. Für die Basis 2 etwa wird aus der Anfangszahl 100 (also 4 im Dezimalsystem) zunächst 001 und dann 0,001, die Binärzahl für 1/8.

Um ein zweidimensionales quasizufälliges Muster mit N Punkten zu erzeugen, beginnen wir mit der Folge der natürlichen Zahlen, $i = 0, 1, 2, ..., N-1$. Für jeden zu konstruierenden Punkt nehmen wir i/N als x-Koordinate; die zugehörige y-Koordinate wird mit dem Van-der-Corput-Verfahren aus der Ziffernfolge für i gebildet. Oben sind die einzelnen Schritte und das Ergebnis im Fall $N = 8$ gezeigt. Das quasizufällige Muster auf S. 89 wurde auf dieselbe Art für $N = 1024$ konstruiert. Inzwischen gibt es viele weitere Verfahren zum Erzeugen von Folgen mit geringer Diskrepanz. Die meisten beruhen ebenfalls auf der Kombination von Zahlen mit den Ziffernfolgen ihrer Darstellung. Einige lassen sich leicht auch auf beliebig hohe Dimensionen verallgemeinern.

Die so gewonnenen Muster zeichnen sich durch ein sorgsam ausbalanciertes Gleichgewicht zwischen Ordnung und Unordnung aus. Die Abstände zwischen den Punkten sind recht gleichmäßig; es gibt also weder Anhäufungen noch leere Bereiche, die bei zufälligen Punktmustern für eine große Diskrepanz sorgen. Allerdings dürfen die Punkte auch nicht in Reihen oder anderen regelmäßigen Strukturen angeordnet sein, was die Diskrepanz ebenfalls erhöhen würde. Das Austarieren dieser beiden gegensätzlichen Ziele ist im zweidimensionalen Fall nicht allzu schwierig; in höheren Dimensionen erfordert es jedoch einige Kompromisse.

Konferenz über Monte-Carlo-Methoden im Jahr 1949 augenzwinkernd – um dann ebendieser Sünde ausgiebig zu frönen.

Auch der Einsatz von Quasi-Monte-Carlo-Verfahren ließ nicht lange auf sich warten. Die erste Veröffentlichung dazu war 1951 ein Bericht von Robert D. Richtmyer (1910–2003), dem Leiter der theoretischen Abteilung in Los Alamos. Dieses Debüt geriet gleich höchst eindrucksvoll. Richtmyer nannte die Gründe für den Einsatz quasizufälliger Stichproben, führte einen Großteil der Terminologie ein und erläuterte die zugehörige Mathematik. In erster Linie lieferte er allerdings ein Dokument des Scheiterns. Der Los-Alamos-Forscher hatte zeigen wollen, dass Quasi-Monte-Carlo-Berechnungen schneller konvergieren. Doch war ihm das nicht gelungen. Berichte über negative Ergebnisse haben durchaus ihre Berechtigung, weil sie andere Forscher vor der Wiederholung nutzloser Experimente bewahren, aber sie können – wie in diesem Fall – auch weitere Untersuchungen auf einem an sich aussichtsreichen Feld verhindern.

Immerhin verfasste Stanisław K. Zaremba 1968, damals an der University of Wisconsin in Madison, eine Lobeshymne auf Quasizufallsstichproben – und eine Schmähredе auf Pseudozufallszahlen. Viele Konvertiten gewann er damit freilich nicht.

Zufall in homöopathischen Dosen

Dennoch kam die Untersuchung der mathematischen Eigenschaften von Folgen mit geringer Diskrepanz über die Jahrzehnte langsam, aber stetig voran. Besonders hervorzuheben sind die Beiträge von Klaus Friedrich Roth (deutschstämmiger Brite und Fields-Medaillen-Gewinner 1958), Ilja M. Sobol (russischer Mathematiker), Harald Niederreiter (heute an der Universität Singapur arbeitender österreichischer Mathematiker) und Ian H. Sloan (australischer Mathematiker an der University of New South Wales in Sydney). Inzwischen ist das Interesse an den Anwendungen der Methode wieder gewachsen, und das nicht nur bei den Analysten an der Wall Street. Vor allem in der Physik, aber auch in anderen Disziplinen werden sie immer populärer; zu den viel versprechenden Einsatzgebieten zählt etwa das Raytracing in der Computergrafik: das Nachverfolgen sämtlicher Lichtstrahlen von der Lichtquelle bis zum Auge des Betrachters, wodurch erst eine realistische Darstellung von dreidimensionalen Szenen möglich wird.

Die wechselnde Beliebtheit des Zufalls ist auch im Zusammenhang mit allgemeineren Trends zu sehen. Im mechanistischen physikalischen Weltbild des 19. Jahrhunderts galt er als unwillkommener Störenfried, der nur dort widerwillig toleriert wurde, wo es sich nicht vermeiden ließ – wie in der Thermodynamik und in Darwins Evolutionstheorie. Im 20. Jahrhundert dagegen kam der Zufall groß in Mode. Den Anstoß dazu gab wohl die Quantentheorie, die nur noch Wahrscheinlichkeitsaussagen erlaubte. Die Monte-Carlo-Modelle folgten. Paul Erdös (1913–1996) führte die zufällige Auswahl sogar in die Methodologie mathematischer Beweise ein – wo man sie wohl am allerwenigsten vermuten würde. In der Computerwissenschaft entwickelten sich zufallsgesteuerte Algorithmen zu einem zentralen Forschungsthema. Der Zufall fand auch Eingang in die Kunst, etwa bei der aleatorischen Musik oder den Dripping-Gemälden von Jackson Pollock (1912–1956). In den 1980er Jahren entstand schließlich die Chaostheorie, der zufolge winzige zufällige Störungen enorme Auswirkungen haben können. In einem Essay aus dem Jahr 1967 nannte der Informatiker Alfred Bork (1926–2007) Zufälligkeit »ein Hauptmerkmal unseres Jahrhunderts«.

Heute jedoch scheint das Pendel wieder in die andere Richtung zu schwingen, vor allem in der Computerwissenschaft. Zufallsgesteuerte Algorithmen haben immer noch große praktische Bedeutung, aber die intellektuelle Herausforderung liegt inzwischen eher darin, zu beweisen, dass sich dieselbe Aufgabe auch mit einem deterministischen Programm lösen lässt. Spannend ist die Frage, ob eine solche »Entrandomisierung« wirklich bei jedem Algorithmus gelingt. Manche Theoretiker glauben das. Auch wenn sie Recht behalten, könnte es in bestimmten Fällen aber weiterhin zweckmäßig sein, den Zufall einzubeziehen.

Ähnliches gilt vermutlich für die Quasivariante, wobei hier das nötige Quäntchen Zufall in möglichst geringer Dosierung verabreicht wird. Vielleicht steuern wir ja auf eine Art homöopathischer Doktrin zu, die besagt, dass die Wirksamkeit eines Heilmittels mit abnehmender Konzentration steigt. In der Medizin ist das zwar Unsinn, aber vielleicht funktioniert es in Mathematik und Informatik.

DER AUTOR

Brian Hayes ist Verfasser der Kolumne »Computing Science« im »American Scientist«, aus der dieser Artikel stammt. In seinem Blog http://bit-player.org bietet er unter anderem ergänzendes Material zu seinen Kolumnen.

QUELLEN

Caflisch, R. E.: Monte Carlo and Quasi-Monte Carlo Methods. In: Acta Numerica 7, S. 1–49, 1998
Chazelle, B.: The Discrepancy Method: Randomness and Complexity. Cambridge University Press, Cambridge 2000
Kuo, F. Y., Sloan, I. H.: Lifting the Curse of Dimensionality. In: Notices of the American Mathematical Society 52, S. 1320–1328, 2005
Matousek, J.: Geometric Discrepancy: An Illustrated Guide. Springer, Heidelberg 1999/2010
Paskov, S. H., Traub, J. E.: Faster Valuation of Financial Derivatives. In: Journal of Portfolio Management 22, S. 113–121, 1995

WEBLINKS

www.puc-rio.br/marco.ind/quasi_mc.html
Beschreibung des Quasi-Monte-Carlo-Verfahrens

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1135755

© American Scientist
www.americanscientist.org

Auf den nächsten Seiten folgt eine Sonderpublikation der Forschungsallianz Kulturerbe >>>>

Walter Lewin
Es funktioniert!
Vom Vergnügen, endlich Physik zu verstehen
Aus dem Amerikanischen von Helmut Reuter.
Knaus, München 2011. 384 S., € 19,99

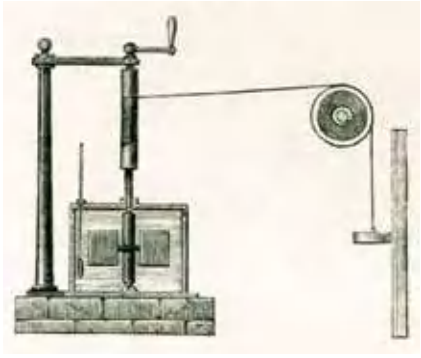
PHYSIK

Liebeserklärung eines Forschers

Der Leser betritt die Welt eines Mannes, der sein Leben der Physik verschrieben hat, und findet sich in einem Alltag voller Wunder wieder.

Walter Lewin ist ein begnadeter Dozent. Mehr als 30 Jahre lang hat er seine Studenten am MIT für Physik begeistert; Millionen Zuschauer betrachten die Aufzeichnungen seiner Vorlesungen im Internet. Nun will er auch seinen Lesern »die Unschuld nehmen«: Ein einziger Blick durch physikalisch trainierte Augen kann die Wahrnehmung der Welt verändern – davon ist Lewin überzeugt.

Bereits im ersten Kapitel versteht es der außergewöhnliche Physikprofessor, Anekdoten aus seinem wissenschaftlichen Alltag behutsam mit anschaulichen Ausflügen in die Theorie zu verweben: von weißen Wolken und blauem Himmel bis zur Ausdehnung des Universums. Es folgen ergreifende Kindheitserinnerungen aus seiner jüdischen Familie in den Niederlanden, die von den Nazis zum Teil ermordet, zum Teil in alle Winde verstreut wurde. Ist das Buch doch eher eine Biografie?



So bestimmte James P. Joule (1818–1889) das mechanische Wärmeäquivalent: Die potenzielle Energie des Gewichts rechts wird durch die Schaufelräder in Wärmeenergie umgewandelt.

Die folgenden Kapitel erinnern an eine Vorlesungsserie – so klar gegliedert, dass man mühelos Themen überspringen kann, die man schon in der Schule gehasst hat, wie Druck, Akustik und Bewegungsgesetze. Aber lassen Sie sich zumindest Lewins wundervolle Ausführungen zu den Geheimnissen des Regenbogens nicht entgehen! Einige Tage nach Lektüre des Buchs beobachtete ich einen prächtigen doppelten Regenbogen in der Abendsonne, und Lewin behielt Recht mit dem, was er die »Schönheit des Wissens« nennt. Wer die Physik des Regenbogens begreift, sieht ihn mit anderen Augen.

Auch die Themen, die nicht so offensichtlich zu Lewins Favoriten gehören wie atmosphärische Lichtspiele, erklärt er lebensnah und routiniert. Aber seine eigentliche Liebe gehört der Astrophysik. Hier hat er Karriere gemacht und war an bahnbrechenden Entdeckungen beteiligt. So wirkt die erste Hälfte des Buchs wie eine hastig absolvierte Vorbereitung, bis er in Kapitel 10 endlich zu »Röntgenstrahlen aus dem Weltall« kommen kann. Bis zum Schluss bleibt Lewin dabei und reißt den Leser immer tiefer in die Geschichte der Röntgenastronomie, die auch seine eigene ist. In Kapitel 14 wird es spannend wie im Kriminalroman, als Lewin mit seinen Messungen versehentlich die nationale Sicherheit gefährdet und sogar seine sowjetischen Kollegen überreden muss, ihre seltsamen Daten zurückzuhalten.

Ein meisterhafter Erklärer kann auf Bilder verzichten, aber Lewin tut das überraschend konsequent. Das ganze Buch enthält nur sieben kleine Bilder. Viel häufiger verweist er auf ergänzendes Material im Internet, wie die Videos seiner Vorlesungen oder Fotos von physikalischen Phänomenen – ein unbequemer Ersatz, der überdies von der im Internet üblichen raschen Veraltung bedroht ist.

Die deutsche Übersetzung entscheidet sich oft dagegen, die direkte Ansprache »you« zu übernehmen, mit der Lewin – beziehungsweise sein Ghostwriter Warren Goldstein – im englischsprachigen Original »For the Love of Physics« seine Ideen dem Leser nahebringt. Die unpersönlichere deutsche Variante »man« verleiht dem Text eine etwas distanzierte und verstaubte Note. Dazu gesellen sich vereinzelte Fehler bei der Übersetzung von Zahlenwerten und Kleinigkeiten, die in einer ersten Auflage aber verzeihlich sind.

Im letzten Kapitel schreibt Lewin von seiner Liebe zur Kunst und verleiht dem Buch wieder den Hauch einer Biografie. Nur in Randbemerkungen erfährt der Leser von persönlichen Ereignissen wie einer schweren Herzoperation, oder dass seine erste Ehe an seiner Hingabe für die Forschung scheiterte. Über die Person Walter Lewin weiß ich auch nach Ende der Lektüre nicht viel, wohl aber über den Wissenschaftler, der im Flugzeug Fensterplätze abhängig von Flugzeit und -richtung bucht, um die beste Sicht auf berechenbare atmosphärische Erscheinungen zu haben.

Wie in seinen Vorlesungen wird es Lewin gelingen, Menschen für etwas zu begeistern, was sie vorher nur als Pflichtfach wahrgenommen haben. Auch wer längst die Schönheit der Physik erkannt hat, wird von ihm lernen können, über Alltägliches wie das Trinken mit dem Strohhalm oder über Kosmisches wie Röntgendoppelsternsysteme.

Mike Beckers
Der Rezensent ist Diplomphysiker und Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

Marcel Robischon
Planet der Insekten
Von duftenden Ameisen, betrügerischen Leuchtkäfern und gespenstischen Faltern
Haupt, Bern 2011. 224 S., € 39,90

ZOOLOGIE

Vermenschlicht, aber prachtvoll anzusehen

Marcel Robischon setzt die Vielfalt der Insekten eindrucksvoll ins Bild. Manche Metaphern sind allerdings fragwürdig.

Es gibt so viele Insektenarten, dass eine intensive wissenschaftliche Beschäftigung mit ihnen allen und ihrem Verhalten das Forschungsvermögen der Zoologen überfordern würde. Derzeit sind etwas mehr als eine Million Arten beschrieben; insgesamt sollen es – je nach Quelle – zwischen 2 und 30 Millionen sein. Die Gesamtzahl der Individuen ist noch eindrucksvoller: Auf jeden menschlichen Bewohner unseres Planeten kommen schätzungsweise 1,5 Milliarden Insekten! Bei solcher Vielfalt erweist sich schon die Abgrenzung zweier Arten als besonders schwierig, weil verwandte Arten einander häufig zum Verwechseln ähnlich sind.

Marcel Robischon, gelernter Forstwirt und Akademischer Rat an der Universität Freiburg, verzichtet denn auch im weiteren Verlauf des Textes auf genaue Zahlen zu den einzelnen Gruppen und überhaupt auf die biologische Klassifizierung als Ordnungsprinzip. So bleibt mehr Raum für das übrig, was man etwas altertümlich als Naturgeschichte bezeichnet.

Kein Blatt: Der Zitronenfalter überwintert als voll entwickeltes Insekt und ist dadurch als einer der Ersten im Frühling aktiv.

BLICKWINKEL / G. STAHLBAUER

Statt besonders interessante Arten (zum Beispiel den Totenkopfschwärmer) aus besonders interessanten Ordnungen (Schmetterlinge) zu betrachten, sucht Robischon nach neuen Blickwinkeln auf seine zahlreichen Beispiele. So verwendet er im Kapitel »Grüne Paläste« die Gallenbildung bei vielen nicht miteinander verwandten Pflanzen sowie deren chemische Steuerung durch Hautflügler, Fliegen, Käfer, Schmetterlinge oder Ameisen, um dann ausführlich zu erklären, was dabei alles geschieht. Neben der allgemeinen Begeisterung für das Gebiet erkennt man seine speziellen Vorlieben für Schmetterlinge, für Gerüche und deren Biochemie, für Inseln und für Stoff-, Energie- und Informationsströme.

In den 19 Kapiteln mit jeweils einem Schwerpunkt geht es unter anderem um die Auswirkung der Isolation auf die Artbildung (»Inselgeschichten«), um das Verschwinden von Arten – manchmal ehe sie überhaupt entdeckt und beschrieben wurden (»Der stille Artentod«) – oder um die Verschleppung von Insekten in fremde Regionen und die damit verbundenen Gefahren (»Entomologische Globalisierung«).

Dank seiner profunden Kenntnisse in Wissenschafts- und Kulturgeschichte kann Robischon seine Texte um äußerst interessante Anekdoten bereichern. So erinnert er an längst vergessene Forscher, die so manche »moderne« Erkenntnis schon viel früher geäußert haben. Und die Flöhe betrachtet er nicht nur biogeografisch (welcher Floh bei wem und wo) und evolutionär (Artspezifität von Wirt und Parasit), sondern schließt gleich noch eine umfangreiche Geschichte des Flohzirkus an.

Gelegentlich gewinnt man den Eindruck, dass die Überfülle an mitteilenswerten Einzelheiten den Verfasser selbst überwältigt hat. Nur so ist es zu erklären, dass er an mehreren Stellen unvermittelt in reinen Wissenschaftsjargon verfällt. Im an sich gut gelungenen Kapitel »Piratenfeuer – kaltes Licht für heiße Liebe« (was für eine Vorankündigung!) geht es um die Bioluminiszenz, also die Erzeugung von Licht durch Lebewesen. Nur mutet Robischon

dem Leser die Erklärung zu, dass »der Trick in der chemischen Reaktion des Luciferins mit der energiereichen Substanz Adenosintriphosphat (besteht), die durch das Enzym Luciferase katalysiert wird«. Auch das Register lässt den Leser hier völlig allein. Dafür entschädigen die fantastischen Bilder der Tiere mit ihrem Leuchten in der Nacht.

Ärgerlich, weil unzulässig vermenschlichend in einem Buch mit wissenschaftlichem Anspruch, sind manche der Kapitelüberschriften und besonders einige der Zwischentitel: »Schwarzfahrer und Brautleute« (Verbreitung durch den Wind), »Parfüm und Parasiten« (Düfte und deren biologische Bedeutungen), »Wenn der Letzte das Licht ausmacht« (Verschwinden der Glühwürmchen), »Wegelagerer und Drogendealer« (Ameisengäste). Einige stilistische Eigenarten des Verfassers sind gewöhnungsbedürftig, so seine Vorliebe für Verbanhäufungen (»es krabbelt und wuselt und wimmelt und schwirrt« gleich mehrfach) oder die Verwendung schiefer Bilder: Wer kommt schon darauf, dass mit »Hundertwasserhäusern« Pflanzengallen gemeint sind? Auch ein »hormonelles Wortgefecht« mit »rhetorischen Tricks« und »subtilen Untertönen« – hier sind es die Wechselwirkungen zwischen Pflanze und Insekt – ist nicht erhellender als die dann zugegebene Tatsache, dass das bis heute noch gar nicht völlig verstanden ist. Einige Rechtschreibfehler (»Gränze« statt »Grenze«) und mehrere falsch orientierte Bilder (so das Präparat einer Köcherfliege mit dem Kopf nach unten) hätte ein sorgfältigeres Lektorat vermeiden können.

Bilder, darunter manche doppelseitig, gibt es genug. Die meisten passen genau zum Text und sind von guter Qualität und hoher Aussagekraft. Einige aber fallen aus dem Rahmen, fast alle davon vom Autor selbst. Er folgt dabei einer Bildsprache namens »künstlerisch abstrakte Naturfotografie«, die bei Wettbewerben derzeit nahezu alle Preise gewinnt. In solchen Fotos ist fast alles unscharf bis auf ein winziges Detail: bei der Zartschrecke auf dem Einband ein kleines Stück des Fühlers, beim Falter auf der Rückseite ein Auge und der Fühleransatz. Nichts gegen die künstlerische Absicht; wenn aber Dinge, auf die es ankommt, in der allgemeinen Unschärfe verschwinden, dann ist es nur Platzverschwendung, wie bei der Heuschrecke, die »auf einer artenreichen Wiese im Schwarzwald« lebt, bei der man aber weder die Heuschreckenart bestimmen noch den Artenreichtum anhand wenigstens einer Blüte nachvollziehen kann. Das Buch bietet genügend hervorragende Beispiele,

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

Alex Bellos

Alex im Wunderland der Zahlen. Eine Reise durch die aufregende Welt der Mathematik

Aus dem Englischen von Bernhard Kleinschmidt. Bloomsbury, Berlin 2011. 480 S., € 24,–

Schon wieder so einer, der glaubt, das Wesentliche an der Mathematik seien die Zahlen (was nur geringfügig weniger absurd ist als die Behauptung, das Wesentliche an der Literatur seien die Buchstaben). Der britische Journalist Alex Bellos ist überaus reisefreudig. Von einem schrägen Typ aus Arizona lässt er sich den albernsten Tiefsinn über besondere Eigenschaften kleiner Zahlen erzählen; vergeblich sucht er nach Beziehungen zwischen der »vedischen Multiplikation« (die man nicht unbedingt kennen muss) und altindischen Weisheiten. Aber zugleich liefert er uns eine Tour de Force durch die klassische Geometrie, Evergreens wie die Paradoxien des Unendlichen und die Fallstricke des Glücksspiels, zum Schluss sogar Perlen wie die hyperbolische Geometrie und Hilberts Hotel mit den unendlich vielen Zimmern. Das alles erzählt Bellos so kurzweilig, eingängig – und korrekt –, dass man seine esoterischen Abwege mühelos vergessen kann. CHRISTOPH PÖPPE

Hugh Aldersey-Williams

Das wilde Leben der Elemente. Eine Kulturgeschichte der Chemie

Aus dem Englischen von Friedrich Griese. Hanser, München 2011. 461 S., € 24,90

Chemische Elemente haben kein Leben – schließlich sind sie unvergänglich –, und auch ihre Wildheit hält sich in Grenzen: Dass sie sich in heißen Partynächten austoben, wäre mir neu. Da ist der Verlag auf der Suche nach einem griffigen Titel deutlich übers Ziel hinausgeschossen; aber das wäre gar nicht nötig gewesen. Passend zum dezenteren Originaltitel »Periodic Tales. The Curious Lifes of the Elements« bietet das Buch ein Potpourri ebenso kurioser wie wissenswerter Fakten über die Entdeckungsgeschichte, die technischen Anwendungen und – eine besondere Delikatesse – die künstlerische Bedeutung der Elemente. Die Chemie bleibt zwar weitestgehend ausgespart; insofern verspricht der deutsche Untertitel zu viel. Trotzdem dürfte sich gut bedient fühlen, wer auf unterhaltsame Weise Interessantes über die Bausteine unserer Welt erfahren möchte. GERHARD TRAGESER

Hubert Filser

Das erste Mal.
Das erste Werkzeug, die erste Musik, das erste Bier, die ersten Künstler, das erste Haustier, die ersten Kleider

Ullstein, Berlin 2011. 336 S., € 18,–

Wer beim täglichen Blick auf die Schlagzeilen am Sinn des Experiments Menschheit zweifelt, dem sei dieses Buch empfohlen. Der Wissenschaftsjournalist Hubert Filser fragt letztlich nach den Besonderheiten unserer Spezies und findet sie in einer fernen Vergangenheit. Welchen Sinn macht das Sprechen? Ist »Pst!« vielleicht ein Relikt der ersten Worte? Wie und warum kamen unsere Vorfahren auf die Idee, ein Feuer zu machen? Filser hat namhafte Experten befragt und macht sich seine eigenen Gedanken. Etwa, dass letztlich alle Menschen einen Migrationshintergrund haben, verließen unsere Ahnen doch in mehreren Auswanderungswellen ihre Heimat in Afrika. Der Journalist stellt Bezüge her und entwickelt Szenarien, um vergangene Lebenswelten anschaulich zu machen, bleibt dabei aber stets auf dem Boden der Wissenschaft. KLAUS-DIETER LINSMEIER

Max J. Kobbert

Das Buch der Farben

Primus, Darmstadt 2011. 240 S., € 39,90

Was ist eigentlich Farbe? Goethe hielt seine Antwort auf diese Frage, die »Farbenlehre«, für bedeutender als sein gesamtes poetisches Schaffen. Farbstoff, elektromagnetische Welle, physiologische Wahrnehmung, individuelles Erleben – diese Bedeutungen »entmischt« der Wahrnehmungspsychologe Max J. Kobbert in seinem reich illustrierten Werk. Verständlich formulierte, anekdotenreiche Ausführungen umfließen Kunstwerke, optische Illusionen und reizvolle Fotografien so geschickt, dass die Lektüre niemals anstrengend wird. Eine Fülle von Einzelphänomenen aus Kunst, Natur und Wissenschaft vermischt sich schließlich wieder zu einem Bild davon, wie der Eindruck von Farbe entsteht. Goethe zog übrigens die falschen Schlüsse über die Physik des Lichts. Nach Lektüre des Buchs ist aber klar: Farbe lässt sich nicht auf Physik reduzieren. MIKE BECKERS

wie man trotz »Abstraktion« von der Umgebung geradezu abenteuerlich genaue Details der wunderbaren Tiere zeigt. Man betrachte nur den Schwarzkäfer auf dem Wüstensand und die beiden Wachtelweizenscheckenfalter, die den gelungenen Abschluss dieses Buchs bilden.

Ein sehr inhaltsschweres, informationsreiches, am Stand der Forschung orientiertes Insektenbuch mit kleinen Mängeln, die man in einer – wünschenswerten – zweiten Auflage beheben sollte.

Jürgen Alberti
Der Rezensent ist Biologielehrer und Naturfotograf in Bad Schönborn.

Tobias Hürter
Du bist, was du schläfst
Was zwischen Wachen und Träumen alles geschieht
Piper, München 2011. 272 S., € 19,99

SCHLAFFORSCHUNG

Freund Morpheus

Das bewusstlose Drittel unseres Lebens ist nicht verschwendet: Wesentliche Züge unserer Persönlichkeit bilden sich im Schlaf.

Ist Schlafen Zeitverschwendung? Warum müssen wir täglich viele Stunden ohne Bewusstsein verbringen? Das wollte Tobias Hürter schon als Kind nicht einsehen – und vor allem die Kontrolle nicht abgeben. Warum reicht es nicht, still dazusitzen, um sich zu erholen? Warum verbringt ein Mensch rund sechs Jahre seines Lebens mit Träumen? Macht Schlafen schön?

Als mittlerweile 39-Jähriger hat der Wissenschaftsjournalist und Mathematiker Tobias Hürter die Ergebnisse unzähliger Studien zusammengetragen und dabei – neben viel Falschem und Überholtem – wissenschaftlich fundierte Antworten auf all diese Fragen gefunden. Die Kindheitsvorstellung von der Entbehrlichkeit des Schlafs musste er dabei aufgeben. Schlaf formt die Persönlichkeit, bewertet Erinnerungen emotional und baut das Weltbild aus. »Wer Mensch sein will, muss schlafen.«

Das Buch hat seine eigene Note, wie schon das Inhaltsverzeichnis zeigt. Jedes Kapitel hat eine Uhrzeit zwischen 21 Uhr und 7.30 Uhr am nächsten Morgen; »die Dauer eines typischen Nachtschlafs« soll zum Durchlesen reichen.

Konsequenterweise geht die Erzählung von der Dämmerung über das Einschlafen, den REM- und den Tiefschlaf bis zum Aufwachen. Dazwischen geht es um Phänomene wie Schlafwandeln, Gähnen, Klarträumen oder Schlafentzug. Hürters Fakten sind oft verblüffend. Wer hätte gedacht, dass bis ins Mittelalter der Nachtschlaf der Menschen aus zwei deutlich getrennten Phasen bestand? Dass Elefanten nur drei Stunden Schlaf brauchen und Giraffen nicht gähnen? Sie enthalten aber auch Desillusionierungen: Schlafen macht leider nicht schlank.

Viele Kapitel beginnen mit einer kurzen Geschichte, die eine Frage aufwirft. Die klärt der Autor dann mit Hilfe wissenschaftlicher Studien. Der Weg der Forschung zur jeweiligen Erkenntnis war lang – teilweise beginnend mit Aristoteles –, mühsam und oft grotesk verschlungen. Bis vor wenigen Jahrzehnten vertraten die Wissenschaftler unhaltbare Positionen – das ist dem Schlafmuffel Hürter persönlich nicht anders gegangen. Aber manche Hartnäckigkeit erregt selbst heute noch Kopfschütteln, so die Suche nach einer »Essenz des Schlafs«. Ein Forscher namens John Pappenheimer verarbeitete tausende Liter Urin, um am Ende sieben millionstel Gramm einer »Essenz« zu gewinnen – die dann keine war. Inzwischen weiß man, dass »die Chemie des Einschlafens viel zu komplex und umfassend ist, um von einer einzelnen Substanz gesteuert zu werden«. Auch die Theorie, Träume seien sinnloses Synapsengeflimmer, hielt sich über mehr als drei Jahrzehnte.

Die Prozesse in Gehirn und Körper beschreibt Hürter präzise, eingängig und – dank seiner lockeren und anschaulichen Sprache – unterhaltsam. Die einfallsreichen Vergleiche tragen zum Verständnis bei. Wer hätte erwartet, dass Gehirnwellen im Prinzip »La Ola durch Zuschauerränge der Stadien« gleichen? Einige Grundkenntnisse über Nervenzellen und neurologische Messverfahren wie das Elektroenzephalogramm (EEG) sind trotzdem hilfreich.

Humorvolle Abbildungen und eingestreute Fallgeschichten lockern das Buch auf. Nur einige Kapitel wie das über den REM-Schlaf enthalten etwas zu reichlich Information. Das Werk ist kein Ratgeber, sondern eine Sammlung von Antworten auf häufig gestellte Fragen. Hürter bewertet die Erkenntnisse nicht, er stellt den aktuellen Wissensstand dar, samt Quellenangabe im ausführlichen Literaturverzeichnis.

Einige Tipps gibt es dann doch – zum Beispiel, dass es zum Einschlafen hilft, das Gesicht mit einem Föhn zu erwärmen. Doch im Vordergrund steht das amüsant aufbereitete Wissen zum Schlaf. Und die Einsicht: »Die Frage, warum wir schlafen, ist ebenso sinnlos wie die Frage, warum wir wach sind.«

Gabi Warnke
Die Rezensentin ist Biologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

NASA

Ein Reifen für den Weltraum

Raumstation zum Aufblasen

»Eine Rakete befördert dieses Paket in den Weltraum. Es enthält aufblasbare Raumfahrerstationen, die wie große Reifen geformt sind und im Innern Wohnraum für eine oder zwei Personen bieten. Goodyear baut eine Teststation von 7,20 m Durchmesser, die von der N.A.S.A. erprobt werden soll. Das Gebilde wird erst im Weltraum aufgeblasen. Die Injektion eines schnell härtenden Kunststoffs zwischen den Wandungen macht die Struktur fest.« Populäre Mechanik 77, Februar 1962, S. 30

Reinraum für Frühchen

1962

»Als einmalig in der Welt gilt zur Zeit die Frühgeburtenstation der Universitätsklinik in Homburg/Saar. In einem Plexiglaszylinder wird die Temperatur bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 70 % ständig auf 30° C gehalten. Entkeimte Luft wird zugfrei in den Zylinder eingeführt. Welche Bedeutung einer modernen Frühgeburtenstation zukommt, kann daraus ersehen werden, daß 10 % aller Neugeborenen in Deutschland Frühgeburten sind und daß im Durchschnitt 30–50 % von ihnen sterben.« Naturwissenschaftliche Rundschau, Februar 1962, S. 70

Quarzuhr für jedermann

»Die außerordentlich hohe Stabilität der Tunneldiode als Frequenzteiler und des Quarzkristalls als Schwingungserzeuger wurde dazu benutzt, eine kleine Uhr zu bauen, die pro Jahr höchstens 5 sec verliert oder gewinnt. Die elektronischen Elemente verbrauchen nur sehr wenig Energie, so daß die Uhr monatelang mit einer kleinen Batterie betrieben werden kann.« Die Umschau in Wissenschaft und Technik 4, Februar 1962, S. 122

1912

Ein direkter Vorfahre des Desertec-Projekts (rechts): Solarthermie für Ägypten

Solarbetriebene Dampfmaschine

»Eine für Aegypten bestimmte Kraftstation stellt unsere Abbildung dar. Wir finden hier eigenartig angeordnete, zur Verdampfung von Aether dienende Apparate. Mit Hilfe seiner Stützfüsse kann jeder Verdampfer in eine Stellung senkrecht zu den Sonnenstrahlen gebracht werden. Ausserdem sind noch auf beiden Seiten Spiegel angebracht. Jeder Verdampfer ist mit einem Ableitungsrohr für den Dampf versehen, der in einen Sammler eintritt und der zu betreibenden Niederdruckmaschine zugeführt wird.« Die Welt der Technik 3, Februar 1912, S. 51–52

Ein Spezialelektromagnet, der Augenoperationen und Röntgendurchleuchtung ersetzte, wurde an der Universität Zürich entwickelt. Der Arzt steuerte die Feldstärke über einen Fußschalter.

Magnet statt Skalpell

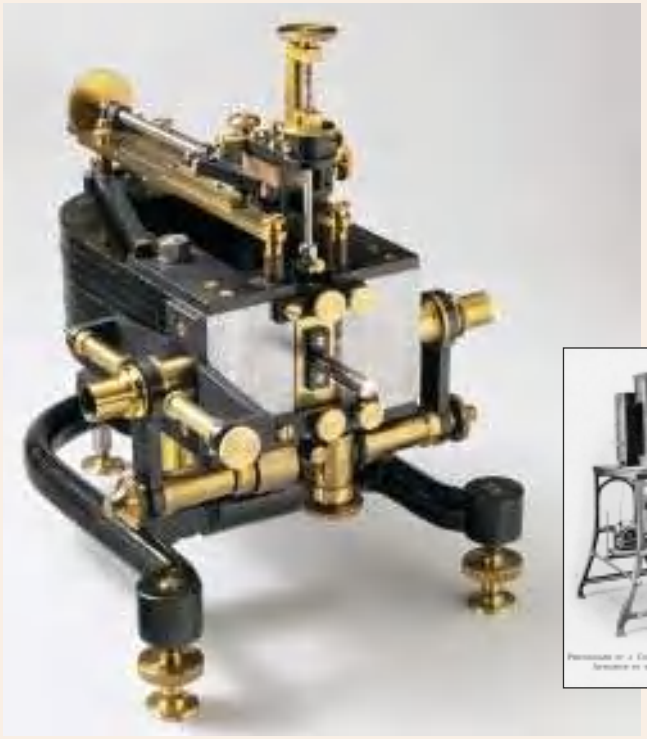
»Zur Entfernung von Fremdkörpern aus dem Auge sind häufig operative Eingriffe erforderlich, die nur dann Erfolg versprechen, wenn sich die Lage des Splitters durch Röntgendurchleuchtung feststellen lässt. Da es sich meistens um magnetisierbare Fremdkörper (Eisenfeilspäne usw.) handelt, lag die Anwendung kräftiger Elektromagneten nahe, und wirklich hat der Versuch gezeigt, dass die Splitter schnell aus dem Auge gezogen werden. Die Vorrichtung gestattet natürlich auch das Herausziehen von Eisenfeilspänen usw. aus anderen Körperteilen.« Prometheus 1162, Februar 1912, S. 287–288

Die Gründe der Tat

»An 600 wegen Eigentumvergehens bestraften Mannespersonen hat Gefängnisdirektor Grundvig, Kopenhagen, festgestellt, ob der Dieb in Not war oder nicht. Unter Not versteht Grundvig dringendes Bedürfnis nach Essen, Kleidung, Wohnung. Werden diejenigen ausgeschieden, die während der Tat berauscht waren, so bleiben nur 13½ % übrig, die wirklich aus Not gestohlen haben.« Die Umschau in Wissenschaft und Technik 6, Februar 1912, S. 121–122

FOTOS: AUS ZEITSCHRIFTEN DER FORSCHUNGSBIBLIOTHEK FÜR WISSENSCHAFTS- UND TECHNIKGESCHICHTE DES DEUTSCHEN MUSEUMS

Herzströme – die Geburt der Elektrokardiografie



GROSSES FOTO: DEUTSCHES MUSEUM; KLEINES BILD: PUBLIC DOMAIN

Wegbereitend für die moderne Elektrokardiografie war das Saitengalvanometer Willem Einthovens (hier ein Gerät, das 1906 von einem renommierten Instrumentenbauer in München gefertigt wurde). Deutlich zu sehen ist der waagrechte Hufeisenmagnet. Die Saite liegt senkrecht dazu im Inneren des Geräts – daher nicht sichtbar – und kann mit der Stellschraube im oberen Teil nachgespannt werden. Rechts und links befindet sich die Beobachtungsoptik.

Das Saitengalvanometer in der praktischen Anwendung: Es ist mittig auf dem Tisch angebracht.

Auf dem ersten internationalen Kongress für Physiologie in Basel 1889 unternahm der britische Physiologe Augustus D. Waller einen Selbstversuch: Er hielt eine Elektrode in der Hand, steckte einen Silberlöffel in den Mund und verband beides über ein Kapillarelektrometer. Dieses Messgerät hatte der französische Physiker Gabriel Lippmann 1872 entwickelt: Floss Strom durch einen Quecksilberfaden in einem Kapillarröhrchen, der mit verdünnter Schwefelsäure bedeckt war, veränderte sich dort seine Wölbung. Mit einem Mikroskop ließ sich diese Änderung messen. Waller bewies damit, dass der Herzschlag mit schwachen elektrischen Spannungen einhergeht.

Angeregt durch diesen Versuch widmete sich unter anderen Willem Einthoven (1860–1927) der Elektrophysiologie. Er war wenige Jahre zuvor, im Alter von 25 Jahren und frisch promoviert, an die Universität Leiden berufen worden. Um einen guten elektrischen Kontakt zur Haut herzustellen, tauchte er Hände oder Füße der Probanden in Salzlösung. Mit dem Kapillarelektrometer konnte er 1900 nachweisen, dass Herzerkrankungen die Spannungskurven, genannt Elektrokardiogramme (EKG), verändern.

Da ihm das Instrument aber zu unzuverlässig und zu unpraktisch erschien, griff Einthoven eine Idee aus der Nachrichtentechnik auf, mit der man die schwachen Morsezeichen am Ende eines Transatlantikkabels lesen konnte. Er spannte einen sehr dünnen Draht senkrecht zu einem starken Magnetfeld. Floss elektrischer Strom durch diese Saite, wurde sie je nach Stromstärke ausgelenkt. Ein Lichtstrahl warf ihren Schatten auf einen Schirm, so dass man die Bewegung mit einem Okular beobachten beziehungsweise auf einem Film aufzeichnen konnte.

Das Saitengalvanometer, das Einthoven 1901 präsentierte, registrierte noch Milliardstel-Ampere-Ströme. Wog der Prototyp ganze 150 Kilogramm – die hauptsächlich auf das Konto des Hauptmagneten gingen –, waren die bald darauf von Firmen vertriebenen Geräte deutlich leichter. Beispielsweise brachte es das hier abgebildete Instrument, 1906 vom renommierten Physikalisch-Mechanischen Institut in München gebaut, auf nur 40 Kilogramm.

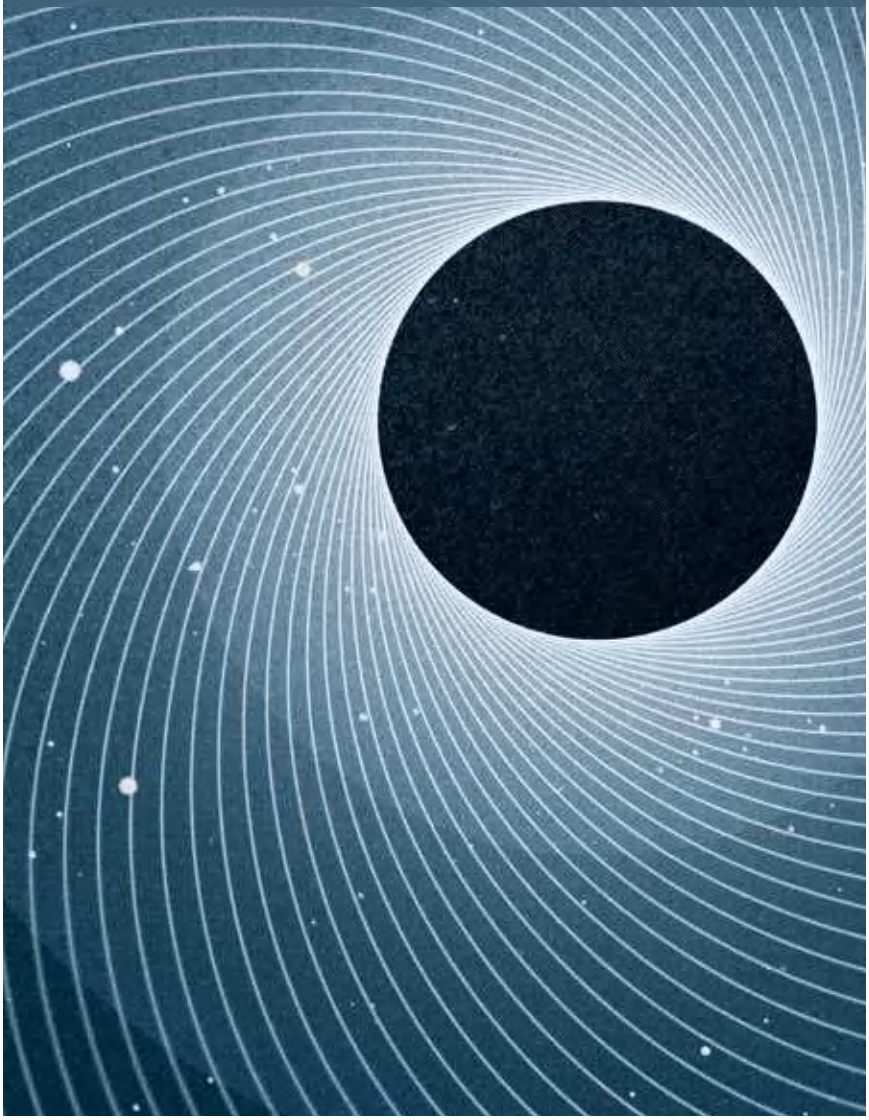
Einthoven entwickelte ein noch heute gültiges Standardverfahren, um EKGs aufzunehmen. Dabei werden drei Spannungskurven abgeleitet: zwischen den beiden Armen, zwischen rechtem Arm und linkem Bein sowie zwischen Arm und Bein auf der linken Körperseite. Außerdem legte der Forscher die theoretischen Grundlagen zur EKG-Analyse und beschrieb beispielsweise, wie sich ein Herzkammerflimmern in den Kurven darstellt.

Nach dem Ersten Weltkrieg brachte die Firma Siemens ein kleines, fahrbares EKG-Gerät auf den Markt, das die weitere Verbreitung der Elektrokardiografie förderte. Diese entwickelte sich zu einem der wichtigsten diagnostischen Verfahren in der Kardiologie. 1924 erhielt Einthoven als Pionier und Begründer der Methode den Nobelpreis für Medizin.

Der Ingenieur und promovierte Technikhistoriker **Frank Dittmann** ist Kurator der Abteilung Energie-, Starkstrom- und Automatisierungstechnik.

Giganten des Weltalls

Die größten Schwarzen Löcher vereinen die Masse von Milliarden Sonnen in sich. Erstaunlicherweise entstanden einige dieser Objekte schon sehr früh im Universum. Entwickelten sie sich tatsächlich aus dem Kollaps einzelner Sterne?



GAVIN POTENZA

VIKTOR DEAK

Evolution der Großeltern

Die zunehmende Zahl Älterer vor etwa 35 000 Jahren war womöglich das Erfolgsgeheimnis unserer Spezies: Sie könnte die Verbreitung neuer Werkzeuge vorangetrieben und damit auch dazu beigetragen haben, dass der moderne Mensch archaischere Gruppen wie den Neandertaler verdrängte

KEVIN VAN AELST

Ausflug ins Fleischlabor

Wie lässt sich der dramatisch wachsende Appetit der Weltbevölkerung auf Schnitzel, Steak und Würstchen zufrieden stellen, ohne den Planeten damit zu Grunde zu richten? Für einige Forscher lautet die Antwort: Fleisch züchten – in der Petrischale!

Tank oder Teller?

Viele Biokraftstoffe werden aus essbaren Pflanzen gewonnen. Ihre massenhafte Herstellung beansprucht riesige Anbauflächen, die dann nicht mehr für die Produktion von Nahrungsmitteln zur Verfügung stehen. Raffinierte Verfahren sollen helfen, diese Konkurrenz zu entschärfen

Neue Waffen gegen Krebs

Um den todbringenden Wucherungen beizukommen, setzen Wissenschaftler inzwischen vermehrt auf Impfstoffe und andere Therapeutika, die Immunreaktionen gegen Tumoren hervorrufen

NEWSLETTER

Möchten Sie regelmäßig über die Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?

Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:
www.spektrum.com/newsletter

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

NEUE WAFFEN GEGEN KREBS
Impfstoffe und andere Immuntherapeutika

MÄRZ 2012

Spektrum DER WISSENSCHAFT 3/12

KUNSTSTOFFE
Materialien, die sich selbst reparieren

ERNÄHRUNG
Wann kommt das Schnitzel aus der Retorte?

SKLAVEREI
Schwarze Leibeigene bei den Cherokee-Indianern

Schwarze Löcher:
Auftritt der Mittelgewichte

Astronomen entdecken einen neuen Typ der Gravitationsmonster

7,90 € (D/A) · 8,50 € (L) · 14,– sFr.
D6179E

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

www.spektrum.de

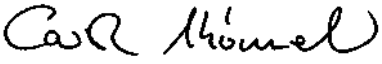
Carsten Könneker
Chefredakteur
koenneker@spektrum.com

Besondere Fragen, besondere Texte

Wenn ich unterwegs bin und Vorträge halte, sprechen mich regelmäßig zwei Typen von Zuhörern an. Man könnte sie holzschnittartig in »die Jüngeren« und »die Älteren« unterteilen; Erstere wollen etwas erhalten, Letztere etwas geben. Die Älteren sind Wissenschaftler. Sie fragen mich, ob »Spektrum« nicht einmal über dieses oder jenes spannende Thema berichten wolle, gern könnten sie Informationen schicken oder selbst in die Tasten greifen. Diese Art der Themen-»Findung« funktioniert freilich nur in Ausnahmefällen; die meisten so an die Redaktion herangetragenen Beiträge fallen bei näherer Betrachtung in der wöchentlichen Konferenz durch. Die jungen Menschen, die mich ansprechen, stellen hingegen eine ganz andere Frage: Wie wird man Wissenschaftsjournalist? Die Antwort ist einfach und komplex zugleich: Einen Königsweg gibt es nicht. Woraufhin ich für gewöhnlich etwas aushole. In den Redaktionen unseres Verlags arbeiten insgesamt rund 20 Redakteure. Jeder von ihnen hat ein Universitätsstudium absolviert – Mathematik, Chemie, Archäologie oder ein anderes Fach –, die meisten Redakteure sind sogar promoviert und haben selbst wissenschaftlich gearbeitet. Doch das ist es auch schon mit den Gemeinsamkeiten. Den Einstieg in den Journalismus fanden die Kollegen auf sehr unterschiedliche Weise, von Volontariaten bei Tageszeitungen über Fernstudiengänge zum Fachzeitschriftenredakteur bis hin zu Quereinstiegen durch Redaktionspraktika. Seit einigen Jahren gibt es zudem an einzelnen Hochschulen die Möglichkeit, gleich nach dem Abitur ein Vollstudium »Wissenschaftsjournalismus« anzutreten. Doch egal, welchen Weg man wählt: Das Wichtigste für angehende Wissenschaftsjournalisten ist, viel von Forschung zu verstehen *und* reichlich redaktionelle Erfahrung zu sammeln.

Um jungen Interessenten genau das zu ermöglichen, bieten auch die Zeitschrift »Spektrum der Wissenschaft« und die Onlineredaktion von Spektrum.de Praktika an. Unsere Praktikanten werden mehrere Monate lang in sämtliche Tätigkeiten des Redakteursalltags eingeführt: recherchieren, Interviews führen, Artikel schreiben, die Manuskripte anderer Autoren bearbeiten, Bebilderungsideen entwickeln und vieles andere mehr. Dabei ermuntern wir die »Kollegen auf Zeit«, möglichst viele eigene Arbeitsproben anzuhäufen. Denn diese zählen bei Bewerbungen in der Medienwelt mehr als die Note der Doktorarbeit. Und so kommt es, dass Sie, liebe »Spektrum«-Leserinnen und -Leser, regelmäßig Texte unserer Praktikanten lesen – oft womöglich ohne dies zu bemerken. Daher möchte ich Ihre Aufmerksamkeit in diesem Heft einmal gezielt auf die Beiträge »Die Vorteile der Sterblichkeit« (S. 14) sowie »Cherokee als Sklavenhalter« (S. 54) lenken. In beiden Fällen sind die Autoren ehemalige »Spektrum«-Praktikanten. Dr. Janina Fischer ist Chemikerin, Julian Willuhn Historiker; über die Unterdrückung schwarzer Sklaven durch die Cherokee forschte er vor seinem Wechsel in den Journalismus selbst.

Eine gute Lektüre wünscht Ihr



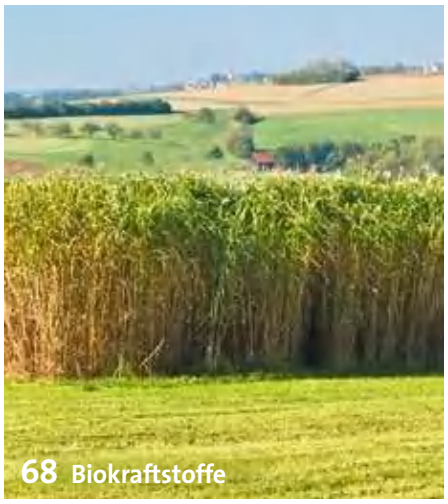
AUTOREN IN DIESEM HEFT

Der Biotechnologe **Eric von Hofe** entwickelt neue Krebstherapien, die ähnlich wie Impfungen wirken. Sie sollen das Immunsystem dazu bringen, Tumorzellen zu vernichten (S. 24).

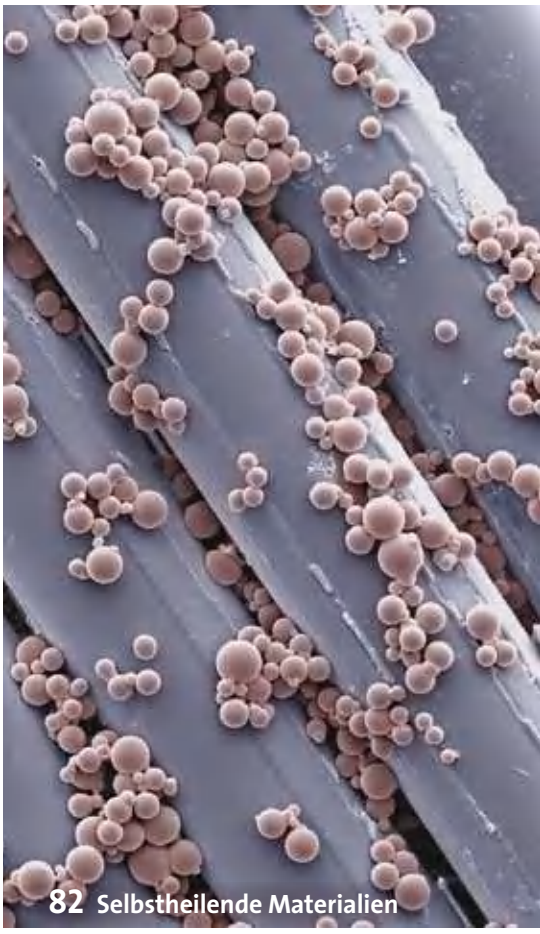
Die junge Astrophysikerin **Jenny E. Greene** ist eine Pionierin bei der Suche nach großen Schwarzen Löchern im Herzen von Galaxien. Dabei entdeckte sie eine neue Klasse dieser Objekte: solche, die auf dem Weg zu einem supermassereichen Schwarzen Loch auf halber Strecke »verhungern« (S. 38).

Scott R. White (links), Professor für Luft- und Raumfahrttechnik an der University of Illinois in Urbana-Champaign, und **Benjamin J. Blaiszik**, Postdoc am Argonne National Laboratory in Lemont, entwickeln Werkstoffe, die sich wie biologische Systeme selbst reparieren können (S. 82).

24 Impfen gegen Tumoren


68 Biokraftstoffe

54 Cherokee als Sklavenhalter


82 Selbstheilende Materialien

BIOLOGIE & MEDIZIN

▸ **24 Immuntherapie gegen Krebs**
Eric von Hofe
Manipulierte Immunzellen könnten den Kampf gegen bösartige Tumoren unterstützen. Ein erster solcher Krebsimpfstoff wurde kürzlich in den USA zugelassen

▸ **32 Steak aus der Retorte?**
Jeffrey Bartholet
Wie lässt sich der wachsende Fleischhunger der Weltbevölkerung befriedigen, ohne den Planeten zu Grunde zu richten? Für einige Forscher lautet die Antwort: Muskelgewebe züchten – in der Petrischale!

PHYSIK & ASTRONOMIE

TITELTHEMA
▸ **38 Mittelgewichte unter den Schwarzen Löchern**
Jenny E. Greene
Mit fast einer Million Sonnenmassen beeinflussen diese Schwerkraftmonster das Schicksal ganzer Galaxien

INTERVIEW
48 Antirealistischer Querdenker
Der Pionier der Stringtheorie Leonard Susskind bezweifelt, dass wir die Realität jemals erkennen können

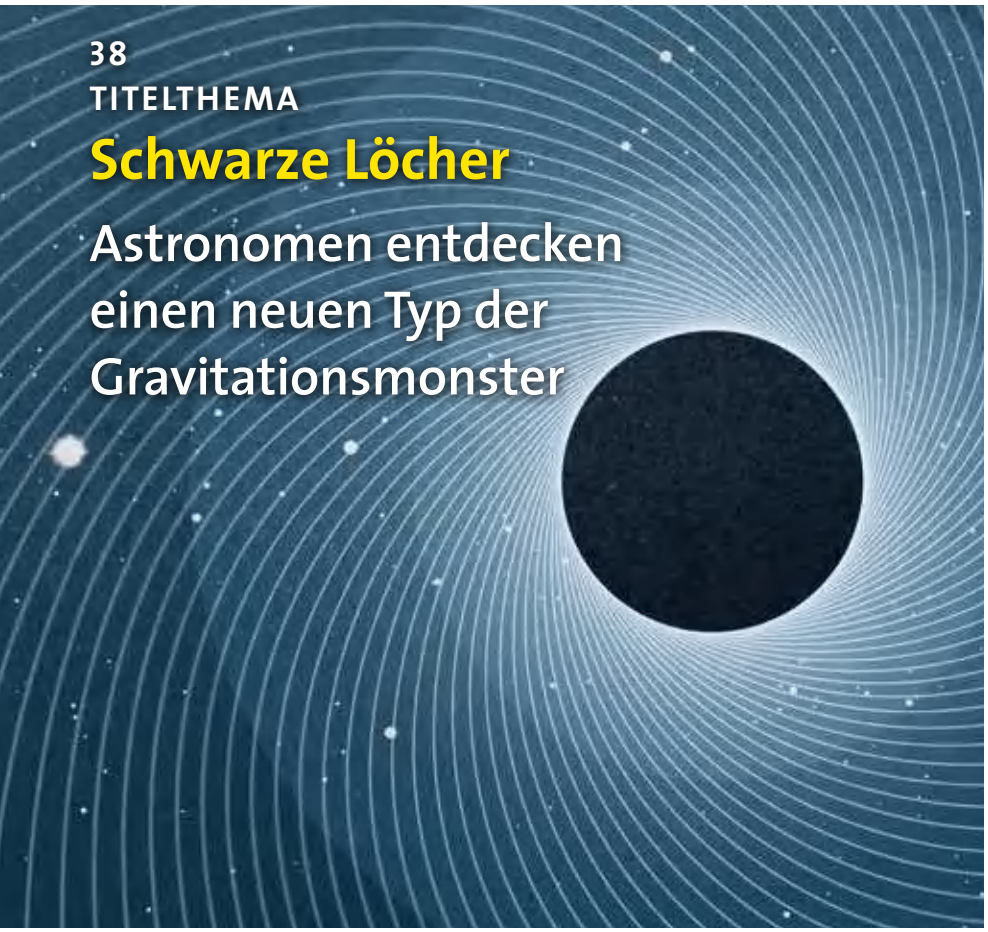
SCHLICHTING!
52 Lange Winter, lange Zapfen
H. Joachim Schlichting
Bei genauem Hinsehen zeigt sich, dass selbst ein einfacher Eiszapfen noch Geheimnisse birgt

MENSCH & KULTUR

▸ **54 Cherokee als Sklavenhalter**
Julian Willuhn
Um in der Welt der Weißen zu überleben, setzten auch manche Indianer auf die Sklaverei

INTERVIEW
58 »Mehr als nur Büffel jagende Nomaden«
Der Historiker Gilles Harvard über nordamerikanische Indianer

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN
61 Die Bilunabirotunda
Norbert Treitz
Ein merkwürdiges Polyeder vermittelt zwischen Würfeln und Dodekaedern in einer periodischen Raumfüllung



38
TITELTHEMA

Schwarze Löcher

Astronomen entdecken einen neuen Typ der Gravitationsmonster

ERDE & UMWELT

SERIE: DIE ZUKUNFT DER ENERGIE

ERDE 3.0

68 Tank gegen Teller
Duncan Graham-Rowe
Ackerfrüchte werden in Kraftstoff umgewandelt, bei steigenden Lebensmittelpreisen. Wie entschärfen wir diesen Konflikt?

74 Kein Zuckerschlecken
Katharine Sanderson
Verholzte Pflanzenreste wären eine ideale Quelle für Biokraftstoffe der zweiten Generation

78 Grünes Benzin?
Neil Savage
Treibstoff aus Biomasse muss billig sein und genügend Energie speichern – sonst ist er am Markt chancenlos

TECHNIK & COMPUTER

▸ **82 Selbstheilende Materialien**
Scott R. White und Benjamin J. Blaiszik
Wenn Werkstoffe versagen, müssen sie kostspielig ausgetauscht werden. Wäre es da nicht besser, sie könnten sich wie biologische Systeme selbst reparieren? Bei Kunststoffen ist das möglich und im Labor schon mit den verschiedensten Methoden gelungen

Titelmotiv: Don Dixon [M]

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▸ gekennzeichnet

SPEKTROGRAMM

10 Die nächste Eiszeit fällt aus • Doppelsterne mit Planeten • Genetisches Feintuning bei Kraken • Alkohol – wirkungslos gemacht • Quasikristall aus dem All • Fleisch fressende Pflanze jagt unterirdisch

BILD DES MONATS

13 Wehrhafte Gurke

FORSCHUNG AKTUELL

14 Die Vorteile der Sterblichkeit
Frühes Ableben kann der Fitness der Nachkommen förderlich sein

16 Vom Wirbelballen zur Turbulenz
Endlich geklärt: Wann die Strömung in Rohren turbulent wird

19 80 Meter antike Philosophie
Eine monumentale Wandinschrift erläuterte einst die Lehre des Epikur

21 Atome im Kristallspiegel
Röntgenspektroskopie für leichte Elemente

22 Springers Einwürfe
Viele Wohnstätten im Weltall

WEITERE RUBRIKEN

3 Editorial

6 Leserbriefe/Impressum

92 Rezensionen
E. P. Fischer: Das große Buch der Elektrizität
J. H. Reichholf: Der Ursprung der Schönheit
G. A. Akerlof, R. E. Kranton: Identity Economics
A. Damasio: Selbst ist der Mensch
S. L. Macknik et al.: Die Tricks unseres Gehirns u. a.

104 Wissenschaft im Rückblick
Vom Lufttrockner zur Referatmaschine

105 Exponat des Monats
Der Baker Electric »Queen Victoria«

106 Vorschau

Sind Wissenschaft und Religion vereinbar?

Der Philosoph und Theologe Christian Tapp sieht im Glauben keinen Widerspruch zur Vernunft – und antwortet auf ausgewählte Zuschriften. (»Vernunft und Glaube«, Januar 2012, S. 56)

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / CLAUS SCHÄFER

Jakob Thomsen, München: Interessant fand ich im Artikel den Versuch, das Glaubenssystem widerspruchsfrei zu machen. Etwas, was nicht mit experimentellen Mitteln fassbar ist, mit mathematischen Mitteln zu untersuchen, erscheint sinnvoll. Es ließe sich festlegen, dass ein Glaubenssystem sich an die Logik oder Mathematik halten muss. Nicht, weil die Logik über »Glaube« steht, sondern weil wir sonst von Anfang an aufgeben müssten, überhaupt darüber zu reden. Insbesondere gilt das mathematische Werkzeug »Beweis durch Widerspruch«. Stellt sich heraus, dass eine Voraussetzung in sich widersprüchlich ist, so sind alle Szenarien, die diese Voraussetzung enthalten, ungültig.

Etwa der Allmächtigkeitsbegriff: Angenommen X wäre allmächtig. Dann könnte X einen Gegenstand erschaffen, den nichts (auch X) niemals verändern kann. Kann X so etwas nicht erschaffen, ist X nicht allmächtig. Gelingt es X andererseits, so einen Gegenstand zu erschaffen, ist X auch nicht allmächtig, denn dann gibt es etwas, das X nicht kann: den Gegenstand verändern. Alle Szenarien, die als Annahme einen allmächtigen Akteur voraussetzen, sind also hinfällig.

Der »Sinn des Lebens« dient dazu, von etwas abzulenken: der Tatsache, dass die (meisten) Menschen sich eine gute Welt wünschen, aber stattdessen eine Welt vorfinden, in der es auch Leid gibt. Der »Sinn des Lebens« ist irrelevant!

Antwort des Autors Prof. Dr. Dr. Christian Tapp: Das Allmachtsproblem wird schon seit Jahren diskutiert. Eine Lösungsmöglichkeit wäre, dass ein allmächtiges Wesen aufhören könnte, allmächtig zu sein. Dann kann es tatsächlich etwas Unveränderbares erschaffen – es muss nur zugleich seine Allmacht ablegen. Oder: Etwas Unveränderbares zu erschaffen, ist logisch unmöglich – unabhängig davon, ob ein Wesen allmächtig ist oder nicht. Logisch Unmögliches sollte man aber auch von einem allmächtigen Wesen nicht verlangen (sonst wird der Begriff trivialisiert!).

Wenn Sie die mathematisch-logischen Methoden erwähnen, sollte auch klar sein, dass ein indirekter Beweis (durch Widerspruch) nicht erlaubt, auf die Falschheit aller, sondern nur auf die Falschheit mindestens einer Prämisse zu schließen (oder auf die inkompatible Formulierung der Prämissen). Man kann also mit Widersprüchen durchaus wissenschaftlich umgehen und sich fragen, welche der Prämissen man verwerfen muss oder wie man die Prämissen vernünftig umformulieren sollte. Die Frage nach dem »Sinn des Lebens« kann man nicht pauschal als Ablenkungsmanöver darstellen. Das ist eine ernsthafte Frage, die Menschen umtreibt, ob sie nun religiös oder nichtreligiös sind.

Peter Albrecht, Oberkochen: Uns bleibt nichts anderes übrig, als daran zu glauben, dass die Erscheinungen in unserem Bewusstsein, die wir mit Vernunft für das tägliche Leben auswerten und mit wissenschaftlicher Akribie untersuchen, eine reale Entsprechung haben. Dieser Sachverhalt betrifft das tägliche Leben und natürlich alle Disziplinen der Wissenschaft. Damit löst sich der vermeintliche Gegensatz zwischen Vernunft und Glaube auf. Da wir alle in letzter Konsequenz auf den Glauben an eine Realität angewiesen sind, steht auch die Theologie gleichberechtigt neben den anderen Disziplinen der Wissenschaft. Der Theologe glaubt nur etwas anderes als der Naturwissenschaftler.

Antwort des Autors: »Glaube« ist mehrdeutig. Der Theologe hat aber neben dem Glauben, den Herr Albrecht erwähnt und mit dem jeder zu tun hat, auch mit dem spezifisch christlichen Glauben zu tun. Der umfasst weit mehr, nämlich, in Glaubenssprache gesprochen, das Vertrauen auf Gottes Wort und die entsprechende Ausrichtung des eigenen Lebens.

Wolfgang Lüdge, Schulzendorf: Für Herrn Tapp ist Glaube identisch mit dem Gottesglauben der monotheistischen Religion. Der Vielgötterglaube im Hinduismus, der Glaube im Buddhismus, der Glaube an ein harmonisches Zusammenleben gemäß der konfuzianischen Lehre, aber auch der Glaube der Atheisten an das moralische Verhalten der Menschen unabhängig von religiösen Dogmen wurde schlicht ignoriert, obwohl die überwiegende Mehrheit der Weltbevölkerung diese Glaubensarten bevorzugt. Die Gleichsetzung des Begriffs Glaube mit dem Gottesglauben diskriminiert auf diese Weise den Glauben derjenigen, die keinen Gott für ihren Glauben an die moralischen Werte einer Gesellschaft benötigen, indem sie als Ungläubige bezeichnet werden, wie leider auch in diesem Artikel geschehen.

Antwort des Autors: Der Ausdruck »Glaube« wird für viele, nicht nur für christliche Haltungen verwendet. In meinem Artikel ging es aber um den

christlichen Glauben – ohne anderes im Entferntesten diskreditieren zu wollen. Als Ungläubiger wird in meinem Beitrag niemand bezeichnet.

Dietmar Schoder, Wien (Österreich): Entweder glauben Sie etwas oder Sie hinterfragen es. Solange Sie glauben, haben Sie eine Antwort. Sobald Sie fragen, riskieren Sie, dass Sie vielleicht nie eine Antwort finden werden. Aber beides geht nicht.

Antwort des Autors: Klar ist Glauben nicht gleich Fragen, aber kompatibel ist es. Ein rationaler Gläubiger muss beides tun: glauben und fragen. Gläubige sollten nie vergessen, dass sie immer noch selbst Suchende sind. Das Pathos, die Wahrheit zu besitzen, steht keinem gut an.

Daniel Schiller, Köln: Auf S. 61 schreibt der Autor, dass der Wahrheitsanspruch des christlichen Glaubens dazu führt (quasi zwingt), dass er Erkenntnissen der Naturwissenschaften nicht widersprechen kann. Interessant: Diesen Gedanken zu Ende gedacht, schafft sich der Glaube selbst ab. Der Glaube trifft dann keine eigenständige Aussage mehr. Er ist vielmehr darum bemüht, zur echten, immer weiter fortschreitenden Erkenntnis kompatibel zu bleiben. Aber dann kann man es auch gleich mit Ockhams Rasiermesser halten: Unnötiges soll man abschneiden!

Antwort des Autors: Ihre Schlussfolgerung würde tatsächlich gelten, wenn die Naturwissenschaft alles Nötige sagen würde beziehungsweise könnte. Sagt sie uns etwas über den Sinn unseres Lebens? Über Moral? Über Gott? Solange es Bereiche von Fragen gibt, die sich nicht naturwissenschaftlich beantworten lassen, führt Kompatibilität nicht zur Überflüssigkeit.

Gerhard Schufmann, Landsberg am Lech: Zum letzten Absatz Ihres Beitrags über die Unmöglichkeiten zweier Wahrheiten im Glauben einerseits und in den Naturwissenschaften andererseits: So offenkundig »unmöglich« (Ihre Aussage) ist das nicht: Thomas von Aquin hatte damit keine Probleme. Für ihn gab es eine Wahrheit der Theologie, die für die außerweltlichen Erfahrungen galt, und eine philosophische Wahrheit, die sich auf die weltlichen Erkenntnisse bezog. Beide mussten nicht deckungsgleich sein, da sie nach Thomas von Aquin für verschiedene Erkenntnisstufen galten.

Antwort des Autors: Hier muss man unterscheiden zwischen dem, was ich meinte, und dem, was Sie ganz richtig erwähnen. Nach Thomas von Aquin gibt es zwei Arten von Wahrheiten – natürliche und übernatürliche –, was ihm heute viel Kritik der Theologen einträgt. Was ich meinte, war aber etwas ganz anderes, nämlich ob es zwei Wahrheiten geben kann, die sich widersprechen, sprich: p und non-p sind beide wahr. Das ist logisch unmöglich. Dass allerdings p und q beide wahr sind, auch wenn p und q zu verschiedenen »Arten« von Wahrheiten gehören, ist gut möglich. Zum Beispiel: Dass ich gerade am Computer sitze, ist eine ganz andere Art von Wahrheit, als dass 2 + 2 = 4. Es gibt in der Mittelalterforschung jedoch auch Diskussionen darüber, ob Thomas von Aquin tatsächlich zwei Arten von Wahrheit, eine »doppelte Wahrheit«, vertreten hat (Anneliese Maier).

Weihnachtsmann und Tannenbaum

Der Soziobiologe Eckart Voland und der Religionsphilosoph Winfried Löffler loteten die Beziehungen und Grenzen zwischen Vernunft und Glaube aus. (»Was können Wissenschaft und Religion voneinander lernen?«, Januar 2012, S. 64)

Jürgen Jensen, Bremen: Auf der erkenntnistheoretischen Ebene scheint es nach einem Patt auszuschauen, wenn der Glaube des Wissenschaftlers an die Existenz einer Welt erwähnt wird. Kann man die Annahme einer existierenden Welt mit dem Glauben eines religiösen Menschen an einen, auch nicht hinterfragbaren, Gott vergleichen, von dem es bekanntlich mehrere Ausfertigungen gibt, was nicht verwundert, da er/sie menschliche Konstruktionen sind? Von der logischen Herangehensweise kann man die jeweiligen Annahmen wohl gleichsetzen, ich frage mich aber: Ist der Glaube an die Existenz des Weihnachtsmanns das Gleiche wie der Glaube an die Existenz eines Tannenbaums?

Antwort von Prof. Dr. Dr. Winfried Löffler: Natürlich nicht. Der Tannenbaum wie auch der Weihnachtsmann sind beide als empirisch problemlos umschreibbare Objekte konzipiert, wobei aber für die Existenz des Tannenbaums erdrückend viel spricht, für die des Weihnachtsmanns nichts. Aber so einfach machen es sich die großen Religionen ja auch nicht: Ihr »Gott« ist kein seltsames empirisches Zusatzobjekt, sondern eher so etwas wie eine Annahme zur weltanschaulichen Komplettierung oder zusammenordnenden Einbettung all dessen, was uns in unseren verschiedenen Lebensbereichen so begegnet. Meinem Verständnis nach meinen sich religiöse Menschen einen besseren Reim auf die Gesamtwirklichkeit machen zu können. Nichtreligiöse Menschen meinen ohne so eine Annahme auszukommen, nehmen aber dafür vielleicht andere weltanschauliche Komplettierungen vor. Das »Beweisziel« in Debatten über solche weltanschaulichen Gesamtdeutungen ist aber gar nicht, dem Gesprächspartner die eigene Position »anzudemonstrieren«, sondern der Nachweis, dass es nicht grundsätzlich unvernünftig ist, so zu denken. Und hier scheint mir der Theismus bessere Karten zu haben, als seine momentane Presse glauben machen mag.

ISTOCKPHOTO / ARPAD RADOCZY

Der Einfluss der Luft

Der Journalist Brain Hayes stellte Modelle vor, die das Flugverhalten von Vogelgruppen erklären sollen. (»Rätselhafte Koordination in Vogelschwärmen«, Januar 2012, S. 90)

Hans Palm, Frankfurt am Main: Am Schluss des Artikels werden drei Punkte erwähnt, die den Forschern mysteriös erscheinen:

a) Vogelschwärme sind nicht kugelförmig, sondern horizontal abgeflacht;

b) an den Rändern eines Schwarms befinden sich mehr Vögel als im Innern;

c) Geschwindigkeitsvektoren, die von der Durchschnittsgeschwindigkeit des Schwarms abweichen, korrelieren über weite Teile des Schwarms.

Ich habe den Eindruck, dass den Forschern ein ganz wesentlicher Punkt entgangen ist: Anders als die im Artikel erwähnten Kugelsternhaufen bewegen sich Vögel nicht im luftleeren Raum, ganz im Gegenteil! Man kann das Verhalten von Vogelschwärmen nicht realistisch analysieren, wenn man die Luftströmungen vernachlässigt, die doch bei so leichtgewichtigen Vögeln sicher eine entscheidende Rolle spielen!

Verständlicherweise bevorzugen die Vögel im Schwarm Positionen, wo sie Windunterstützung haben und sie selbst Kraft sparen können. Daher die abgeflachte Form des Schwarms: So ist die Schwarmoberfläche größer, es haben mehr Vögel Kontakt zum Wind. Daher halten sich die Vögel lieber an den Rändern auf; dort und hinten haben sie höhere Geschwindigkeiten.

So bleibt beim Verhalten von Vogelschwärmen nicht mehr viel Rätselhaftes übrig, außer vielleicht: Warum steigen Vögel derselben Art überhaupt gleichzeitig auf, vereinigen sich zu Schwärmen, die kunstvolle Manöver vollziehen, und lassen sich dann wieder an ihrem Ausgangsort nieder?

Ich vermute, weil es ihnen einfach Spaß macht. Wir Menschen gehen auch gerne zu Popkonzerten oder auf Fußballplätze, um dieses besondere Gemeinschaftserlebnis zu empfinden.

Gelangt fremde RNA auch ins Erbgut?

(»RNA aus der Nahrung beeinflusst Cholesterinspiegel«, Spektrogramm November 2011, S. 10)

Bernhard Abmayr, Dormitz: Gerade für die Beurteilung der Gefahren der Gentechnik ist dieser Artikel hochinteressant. Wenn fremde RNA-Schnipsel die Funktionen im eigenen Körper beeinflussen können, liegt doch die Vermutung nahe, dass bei Veränderung der fremden RNA auch dieser Einfluss sich verändert oder neu entstehen könnte. Auf die natürlichen RNA-Schnipsel hat sich der Körper in langer Evolution einstellen können. Wer kann aber abschätzen, wie gentechnisch veränderte RNA-Schnipsel wirken werden? Wie der Autor selbst schreibt, ist dieses Gebiet noch weit gehend unerforscht. Könnte es sogar sein, dass unser Körper in vielfacher Weise auf fremde RNA angewiesen ist? Welche Folgen hätte eine solche Erkenntnis für die Produktion von Nahrungsmitteln, besonders von gentechnisch veränderten Nahrungsmitteln und von Kunstnahrung, bei der diese Informationen fehlen oder verändert wurden?

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.)
Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser (Monatshefte), Dr. Gerhard Trageser (Sonderhefte)
Redaktion: Thilo Körkel (Online-Koordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke
E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Editor-at-Large: Dr. Reinhard Breuer
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Redaktionsassistenz: Anja Albat-Nollau
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114
Verlagsleiter: Richard Zinken
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Gerald Bosch, Dr. Markus Fischer, Dr. Rainer Kayser

Leser- und Bestellservice:
Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung:
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 7,90 (D/A) / € 8,50 (L) /sFr. 14,–; im Abonnement € 84,– für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Die Preise beinhalten € 8,40 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 8,40 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e.V. erhalten SdW zum Vorzugspreis.
Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Bereichsleitung Anzeigen: Marianne Dölz; Anzeigenleitung: Marco Buch, Tel. 0211 887-2483, Fax 0211 887 97-2483; verantwortlich für Anzeigen: Christian Herp, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887 2481, Fax 0211 887-2686
Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 33 vom 01.01. 2012.
Gesamtherstellung: L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2012 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
75 Varick Street, New York, NY 10013-1917
Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven Inchcoombe, Vice President, Operations and Administration: Frances Newburg, Vice President, Finance, and Business Development: Michael Florek, Managing Director, Consumer Marketing: Christian Dorbandt, Vice President and Publisher: Bruce Brandfon

Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

Wenn nun solche fremde RNA in unsere Zellen eindringt, stellt sich die Frage, ob Teile davon gelegentlich auch in unser Erbgut eingebaut werden. Bei Bakterien und anderen niederen Lebewesen ist ein horizontaler Gentransfer ja längst nachgewiesen.

Nachhilfe in französischer Geografie

Der Archäologe Vincent Carpentier beschrieb, wie sich die Wikinger Ende des 9. Jahrhunderts in die westfränkische Gesellschaft eingliederten. (»Friedliche Berserker«, November 2011, S. 60)

Gérard Dossier, Roquebrune (Frankreich): Auf S. 62 steht in der rechten Spalte oben: »So gilt die etwa 15 Kilometer vor der Seinemündung im Atlantik gelegene Insel Oissel ...« In Wirklichkeit stimmt aber:

1. Die Seinemündung läuft zum Ärmelkanal!
2. Oissel ist eine Stadt an der Seine östlich von Rouen, also zirka 50 Kilometer von der Mündung entfernt.
3. Bei Oissel sind tatsächlich Inseln in der Mitte der Seine.

Antwort der Redaktion:
In der Tat liegt Oissel 15 Kilometer südlich (nicht östlich) von Rouen und damit gut 50 Kilometer von der Seinemündung entfernt. Etwas unklarer ist das Bild bezüglich des Ärmelkanals. Der wird mitunter zum Atlantik gerechnet, mal als Randmeer des Atlantiks bezeichnet und dann wieder als Verbindung von Atlantik und Nordsee.

Spinnen können das auch!

Der Neurobiologe Kenneth Catania erforschte die ausgeklügelte Fangtechniken einer Wasserschlange. (»Die Tricks der Fühlerschlange«, Februar 2012, S. 30)

Wilfried Osterfeld, Verl: An einer sonnenbeschienenen Wand habe ich vor Jahren eine jagende Spinne beobachtet. Sie pirschte sich an eine sitzende Fliege so an, dass sie sich in einer Position oberhalb ihrer Beute befand. Dann bereitete sie sich auf den Angriff vor wie eine Katze, tupfte ihren Sicherungsfaden fest und sprang. Dabei war nach meinem Eindruck ihr Ziel der Punkt in der Luft oberhalb der Fliege, an dem sie mit der alarmiert startenden Fliege zusammentraf. Der Absturz wurde durch den Sicherungsfaden verhindert. Mahlzeit!

Verwirrende Zahlen

Laut dem Physiker Gerhard Samulat könnte die Windenergie allein bereits den weltweiten Strombedarf decken. (»Die Zukunft der Energie, Teil 2: Frische Brise«, Januar 2012, S. 78)

Fabian Cundano Maltez, Erfurt: Heißt es noch auf S. 80, dass mit der Enercon E-126 Windkraftanlage (7,5 MW) etwa 10 000 Haushalte mit Strom versorgt werden können, so steht auf S. 82, der Èole Vertikalrotor habe mit seinen etwa 4 MW rund 800 Einfamilienhäuser versorgt. Das heißt, pro MW Windenergie können 1300 »Haushalte« oder 200 »Einfamilienhäuser« versorgt werden – ein Unterschied von mehr als Faktor sieben (ein Einfamilienhaus ist genau ein Haushalt). Welche Zahlen stimmen denn nun?

Leider erlebe ich immer wieder, dass Vertreter von unterschiedlichen Energiekonzepten sich ihre Zahlen schönrechnen, um am Ende die Überlegenheit ihres Systems zu preisen. Es wäre wünschenswert, dass Standards erklärt werden, nach welchen Energiekonzepte objektiv verglichen werden können – um den Leser eben gegen Schönfärberei durch Lobbygruppen zu rüsten.

Antwort des Autors Gerhard Samulat: Die Diskrepanz erklärt sich folgendermaßen: Die Angabe zum Darrieus-Rotor Èole ist eine Quellenangabe aus: www.energyprofi.com/jo/Besondere-Windenergiesysteme.html. Da der Rotor nicht mehr arbeitet, kann ich diese Angabe nicht weiter nachprüfen. Sie deckt sich aber mit anderen Quellen. Hier wird von (kanadischen) Einfamilienhäusern aus dem Jahr 1992 geredet.

FOLGEN SIE UNS IM INTERNET

facebook
www.spektrum.de/facebook

YouTube
www.spektrum.de/youtube

studiVZ
www.spektrum.de/studivz

twitter
www.spektrum.de/twitter

Die Angabe zur Enercon E-126 habe ich wie folgt berechnet: Energieversorger gehen davon aus, dass ein (deutscher) Haushalt heute im Schnitt 3500 Kilowattstunden Strom im Jahr verbraucht. Ich habe vorsichtshalber einen Wert von 4500 kWh angenommen. Dividiert man ihn durch die Anzahl der Stunden im Jahr (365 × 24 = 8760), macht das einen Durchschnittsverbrauch von 514 Watt. Dann habe ich nur noch die 7,5 MW durch 514 W geteilt und erhielt 14 591 Haushalte. Zur Sicherheit habe ich diesen Wert großzügig auf 10 000 Haushalte abgerundet, weil die Haushalte nicht immer gleich viel verbrauchen, sondern mal mehr und mal weniger. Die Aussage kann also so stehen bleiben und hat nichts mit Schönfärberei oder gar Lobbyismus zu tun.

BRIEFE AN DIE REDAKTION

... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf www.spektrum.de/leserbriefe oder schreiben Sie mit Ihrer kompletten Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Leserbriefe
Sigrid Spies
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

Die vollständigen Leserbriefe und Antworten der Autoren finden Sie ebenfalls unter: www.spektrum.de/leserbriefe

KLIMAFORSCHUNG

Die nächste Eiszeit fällt aus

Eigentlich müsste die gegenwärtige Warmzeit innerhalb der kommenden 1500 Jahre enden. Denn die sommerliche Sonneneinstrahlung auf der Nordhalbkugel befindet sich wegen der Bahnbewegungen der Erde derzeit in einem Minimum. Die ansteigende Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre verhindert jedoch über den globalen Treibhauseffekt, dass die nächste Vereisung einsetzt, behaupten Wissenschaftler um den Geografen Chronis Tzedakis vom University College London.

DREAMSTIME / KEITH WHEATLEY

Eisflächen reflektieren viel Sonnenlicht und wirken so der Erwärmung entgegen.

Die Forscher analysierten die Eiszeitzyklen der vergangenen 800 000 Jahre. Dazu werteten sie verschiedene Daten aus: CO_2- und Methankonzentrationen in Eisbohrkernen, Sauerstoffisotopenwerte in Meeressedimenten und Langzeitsimulationen der irdischen Sonneneinstrahlung. Anhand dieser Angaben fanden die Wissenschaftler eine Warmzeit vor etwa 780 000 Jahren, deren Bedingungen den heutigen glichen; insbesondere endete sie mit einem ähnlichen Minimum der sommerlichen Einstrahlung. Überträgt man ihren Verlauf auf die gegenwärtige Warmphase, die seit etwa 11 000 Jahren anhält, dann sollte die nächste Vereisung innerhalb der kommenden 1500 Jahre beginnen.

Allerdings betrug der CO_2-Gehalt der Atmosphäre vor 780 000 Jahren nur etwa 250 ppm (parts per million, also tausendstel Promille). Heute liegt er – durch menschliche Einflüsse – bei 390 ppm. Der dadurch bewirkte Treibhauseffekt erklärt, warum das derzeitige Minimum der sommerlichen Einstrahlung die globalen Durchschnittstemperaturen nicht sinken lässt.

Wie die Forscher betonen, kann der natürliche Eiszeitzyklus die menschengemachte Erderwärmung nicht ausgleichen. Denn die eiszeitliche Temperaturabnahme beruht großteils darauf, dass größer werdende Eisflächen immer mehr Sonnenlicht zurückwerfen. Wachsen die Eisschilde nicht, dann setzt auch keine verstärkte Reflexion ein und es bleibt warm.

Nature Geoscience 5, S. 138–141, 2012

ASTRONOMIE

Viele Doppelsterne haben Planeten

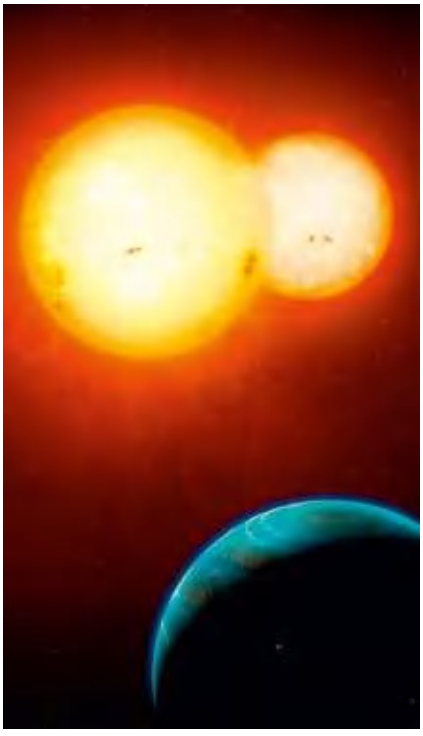
Lange galt es als unwahrscheinlich, dass zwei einander umkreisende Sterne dauerhaft Planeten an sich binden können. Denn die Schwerkraft in ihrer Umgebung schwankt sehr stark. Ein Team um den Astronomen William Welsh von der San Diego State University (Kalifornien) entdeckte nun jedoch, dass möglicherweise Millionen Doppelsterne in der Milchstraße von Planeten umrundet werden.

Mit Hilfe des Weltraumteleskops Kepler untersuchten Welsh und seine Kollegen 750 ferne Sonnensysteme. In dieser Stichprobe stießen sie auf zwei große Gasplaneten, Kepler-34 b und Kepler-35 b, die je einen Doppelstern umkreisen. Beide sind etwa 5000 Lichtjahre von uns entfernt. Die Planeten verrieten sich dadurch, dass sie immer wieder vor ihren Muttersternen vorüberziehen und diese dabei verdunkeln. Bereits im vergangenen Jahr hatte ein anderes Forscherteam den ersten Planeten um ein Doppelgestirn entdeckt: Kepler-16 b.

Zusammen mit den beiden neuen Funden kennt man nun also drei davon. Auf die gesamte Milchstraße hochgerechnet sollte es dementsprechend mehrere Millionen Doppelsterne mit Riesenplaneten geben, schreiben die Forscher.

Laut fotometrischen und spektroskopischen Untersuchungen ist Kepler-34 b etwa ein Fünftel und Kepler-35 b etwa ein Achtel so schwer wie Jupiter. Beide Planeten weisen drei Viertel des Jupiterradius auf.

Nature 481, S. 475–479, 2012



MARK A. GARLICK / SPACE-ART.CO.UK

Der Planet Kepler-35 b (vorn) umrundet seine Muttersterne einmal in 131 Tagen.

MOLEKULARBIOLOGIE

Genetisches Feintuning bei Nervenzellen von Kraken

Einige Krakenarten leben im warmen Tropenwasser, andere in der eiskalten Arktis. Mit sinkender Temperatur arbeiten jedoch die Ionenkanäle immer langsamer, die sich für die Signalleitung in Nervenzellen öffnen und schließen müssen. Deshalb hatten Forscher bisher angenommen, dass Kraken aus polaren Gebieten veränderte Gene besitzen – für Ionenkanäle, die auch nahe null Grad Celsius rasch auf- und zumachen. Sandra Garret und Joshua Rosenthal von der Universidad de Puerto Rico haben nun gezeigt, dass das nicht der Fall ist: Die betreffenden Gene unterscheiden sich zwischen tropischen und polaren Krakenarten praktisch nicht. Stattdessen übersetzen die verschiedenen Spezies ihre Erbinformation in unterschiedliche Kanalproteine, indem sie nachträglich die von den Genen abgelesene Boten-RNA verändern, welche wiederum den Bauplan für das Protein liefert. Mit Hilfe dieses »RNA-Editing« wandeln Kälte liebende Kraken einen Kaliumkanal so ab, dass er an einer bestimmten Stelle die Aminosäure Valin statt Isoleucin enthält. Der veränderte Kanal klappt schneller vom offenen in den geschlossenen Zustand, was die Feuerrate der Nervenzellen erhöht und auch bei Eiseskälte eine rasche Informationsverarbeitung erlaubt.

Sciencexpress 10.1126/science.1212795, 2012

Überleben im Eiswasser: Antarktische Kraken passen sich an die niedrige Außentemperatur an, indem sie schnellere Ionenkanäle

NERC CHESSO CONSORTIUM

PHARMAKOLOGIE

Alkohol – wirkungslos gemacht

Alkohol kann viele schädliche Effekte haben, vom »Kater« bis zur Sucht. All diese Wirkungen scheint eine Substanz zu neutralisieren, die Wissenschaftler um Jing Liang von der University of California in Los Angeles untersucht haben. Es handelt sich um das Molekül Dihydromyricetin (DHM) aus dem Japanischen Rosinenbaum. Die Extrakte des Baums gelten in der chinesischen Heilkunde schon seit Jahrhunderten als bewährtes Antikatermittel – zu Recht, wie die Forscher in ihren Experimenten herausfanden.

Als Erstes flößten sie Ratten eine kräftige Dosis Ethanol ein. Legten sie die Tiere anschließend auf den Rücken, gelang es diesen mehr als eine Stunde lang nicht, wieder auf die Beine zu kommen. Hinterher zogen sich die Nager ängstlich in die versteckt gelegenen Bereiche ihres Laufgeheges zurück – das typische Anzeichen eines Katers.

Hatten die Ratten aber zusammen mit dem Alkohol etwa ein Milligramm DHM pro Kilogramm Körpergewicht erhalten, waren sie bereits nach wenigen Minuten wieder auf den Beinen und verhielten sich wie nüchterne Artgenossen. Der Wirkstoff half sogar beim Entzug: Tiere, die seit Wochen an exzessives Trinken gewöhnt waren, verminderten ihren Alkoholkonsum innerhalb weniger Tage drastisch, sobald ihr Getränk DHM enthielt.

Tests zeigten, dass die Substanz dasselbe Molekül in Nervenzellen beeinflusst, über das auch Alkohol wirkt: den $GABA_A$-Rezeptor, der hemmende Signale im Gehirn weiterleiten hilft. Nach ersten Einschätzungen hat

PUBLIC DOMAIN

Ein Zweig des Japanischen Rosinenbaums. Extrakte aus dessen Holz bewähren sich schon lange als Antikatermittel.

DHM weniger Nebenwirkungen als andere bisher getestete Pharmaka gegen Alkoholeffekte, die den $GABA_A$-Rezeptor beeinflussen. Die Forscher sind zuversichtlich, die Substanz bald an Menschen erproben zu können.

The Journal of Neuroscience 32, S. 390–401, 2012

MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de

Aktuelle Spektrogramme
finden Sie täglich unter
www.spektrum.de/spektrogramm

MINERALOGIE

Natürlicher Quasikristall stammt aus dem All

Vor zwei Jahren haben Forscher erstmals einen natürlich entstandenen Quasikristall entdeckt – in einem Stein, der aus den Koryakbergen auf der sibirischen Halbinsel Kamtschatka stammt (siehe SdW 12/2011, S. 18). Nun legt das Team um Paul Steinhardt von der Princeton University, New Jersey, eine detaillierte Analyse des Brockens vor. Daraus folgt, dass er wohl nicht auf der Erde entstanden ist.

Der Stein enthält diverse Mineralien, darunter die seltenen Formen Khatyrkit und Cupalit. In seinem Kern finden sich Quasikristalle aus Ikosahedrit, einer Legierung aus Aluminium, Kupfer und Eisen, deren Atome sich zu einem Gitter mit fünfzähliger Drehsymmetrie anordnen. Verblüfft waren die Forscher, als sie ein Körnchen Stishovit fanden – eine seltene Variante von Quarz, die nur bei extrem hohem Druck entsteht, etwa während eines Meteoriteneinschlags. Zusätzlich ermittelten die Wissenschaftler das Sauerstoffisotopenverhältnis in den Mineralien des Steins. Es ähnelt dem von Meteoriten, die aus dem Gas- und Staubnebel des frühen Sonnensystems entstanden sind, und unterscheidet sich klar von der Isotopenmischung irdischer Gesteine. Das lässt nach Ansicht der Wissenschaftler keinen Zweifel daran, dass der Brocken extraterrestrischen Ursprungs ist.

Die Analysen erlauben keinen eindeutigen Schluss darauf, wie der Stein genau entstanden ist. Doch deuten sie darauf hin, dass sich Quasikristalle im Weltall bilden und über sehr lange Zeiträume hinweg stabil bleiben können.

PNAS 109, S. 1396–1401, 2012

BOTANIK

Fleisch fressende Pflanze jagt unterirdisch

Das unscheinbare Wegerichgewächs *Philcoxia minensis* besiedelt im östlichen Brasilien sehr nährstoffarme Sandböden, auf denen nur wenige andere Pflanzen zurechtkommen. Nun haben Forscher um Rafael Silva Oliveira von der Campinas-Universität in Sao Paulo (Brasilien) herausgefunden, wie *Philcoxia* dort überlebt: Die Pflanzen fangen Fadenwürmer mit unterirdischen Klebefallen und nutzen sie als Nahrung.

Philcoxia minensis bildet an ihrer Basis unter der Erdoberfläche kleine Blätter aus, die auffallend klebrig sind. Die Forscher setzten ihr speziell herangezogene Fadenwürmer vor, deren Gewebe mit Stickstoffisotopen ^{15}N angereichert war. Mehrere Stunden später fanden sich massenhaft tote Würmer auf den unterirdischen Blättern, und ein Teil der Isotope war ins Blattinnere gelangt. Zudem stieg nach der Fütterung der gesamte Stickstoffgehalt der Pflanze deutlich an. Weiterhin wiesen die Forscher so genannte Phosphatasen auf den Fangblättern nach: Enzyme, die die festgeklebten Tiere wohl verdauen helfen.

Die Wissenschaftler beschreiben damit erstmals eine Fleisch fressende Pflanze, die ihre Opfer mit unterirdischen Klebeblättern fängt. Wie bei anderen Fleisch fressenden Gewächsen, zum Beispiel Sonnentau, dürfte es sich dabei um eine Anpassung an den sehr nährstoffarmen Lebensraum handeln.

PNAS 109, S. 1154–1158, 2012

Philcoxia minensis macht auf den ersten Blick nicht viel her. Unterirdisch jedoch bildet sie raffinierte Klebefallen aus (kleines Bild), mit deren Hilfe sie Fadenwürmer (Pfeil) fängt.

PEREIRA C.G. ET AL., IN: PNAS 109, S. 1154–1158, 2012, FIG. 1A + 3

BESTECHENDE VERTEIDIGUNG

Junge Gurken wissen sich gegen Fressfeinde zu wehren: Auf ihrer Oberfläche sitzen winzige Härchen (Trichome), deren zarte Spitzen um ein Vielfaches dünner sind als die einer Nähnadel. Das Zubeißen wird so zu einem unangenehm stachligen Erlebnis. Außerdem enthalten die Trichome an der Basis bittere, toxische Cucurbitacine, die wirkungsvoll den Geschmack verderben.

Für das bloße Auge erscheinen diese Härchen als zarter Flaum – erst bei 800-facher Vergrößerung unter dem Polarisationsmikroskop wird die spitze Verteidigung sichtbar. Das Bild wurde im Rahmen des 2011 International Science and Engineering Visualization Challenge ausgezeichnet.

ROBERT ROCK BELLIVEAU

MATHEMATISCHE MODELLIERUNG

Die Vorteile der Sterblichkeit

Gibt es einen evolutionären Grund dafür, dass unsere Lebensspanne begrenzt ist? Hinweise darauf liefert nun eine Computersimulation.

VON JANINA FISCHER

Warum müssen wir eigentlich grau, faltig und gebrechlich werden und schließlich sterben? Weil unser Körper dem Verschleiß unterliegt, ist die übliche Antwort. Aber lässt sich dem nicht entgegenwirken?

Der menschliche Körper hat im Lauf seiner Evolution unzählige Reparaturmechanismen entwickelt. Sie beheben oder mildern Zellschäden, wie sie ständig durch Mutationen oder Umwelteinflüsse entstehen. Die Folgen der Langzeitnutzung sind nicht grundsätzlich anderer Art. Eigentlich sollte der Körper sie dann doch ebenso erfolgreich bekämpfen können.

In den Industrieländern ist die durchschnittliche Lebenserwartung in den letzten Jahren deutlich angestiegen. Vieles spricht dafür, dass sich dieser Prozess immer weiter fortsetzt (siehe auch Spektrum der Wissenschaft 11/2011, S. 52).

Doch wenn eine Lebensverlängerung um mehrere Jahrzehnte oder gar eine potenzielle Unsterblichkeit prinzipiell möglich ist, warum hat sie sich im Verlauf der natürlichen Evolution nicht längst etabliert? Immerhin wäre es ein gewaltiger Selektionsvorteil, wenn man eine unbegrenzte Zeit lang Nachkommen in die Welt setzen könnte.

André C. R. Martins von der Universität São Paulo (Brasilien) hat sich auf die Suche nach Gründen für das Altern gemacht *(Public Library of Science one 6, S. e24328, 2011)*. Dazu simulierte er mit Hilfe eines Computerprogramms eine aufs Äußerste vereinfachte evolutionäre Konkurrenzsituation. Wie in solchen Simulationen üblich, besteht das Biotop aus einer quadratischen Fläche, die in lauter einzelne Felder eingeteilt ist – in diesem Fall zunächst 51 mal 51 Stück. Damit der Rand des Gebiets keine besondere Rolle spielt, denkt man sich die rechte Seite des Quadrats mit der linken und die obere mit der unteren verklebt (periodische Randbedingungen). Auf jedem Feld kann sich höchstens ein Individuum befinden. Die Zeit ist diskretisiert: Aus dem Gesamtzustand des Systems zu einem Zeitpunkt berechnet das Programm den Zustand eine gewisse Zeit – sagen wir ein Jahr – später, daraus den Zustand im übernächsten Jahr und so weiter.

Sterblichkeit ist nachteilig – vorerst

In Martins' Simulation gehören die virtuellen Tierchen zu zwei Arten. Die einen sterben spätestens nach fünf Jahren, die anderen sind im Prinzip unsterblich. Jedes Jahr setzt jeder Überlebende in einem gewissen Abstand vom eigenen Standort ein Kind in die Welt. Sowie dadurch zwei Tierchen auf dasselbe Feld geraten, kommt es zum Zweikampf. Dabei bleibt offen, ob sie sich aktiv umzubringen versuchen oder nur einander die Ressourcen wegfressen. Der Zufall bestimmt, wer aus dem Kampf als Sieger hervorgeht; aber die Gewinnwahrscheinlichkeit ist proportional der Fitness.

In dieser schlichten Zahl fasst Martins alle Eigenschaften zusammen, die dem Überleben des Tiers förderlich sind. Fitness ist erblich, unterliegt allerdings der Mutation. Abhängig vom Zufall ist die Fitness des Kinds entweder gleich der des Elterntiers oder um einen kleinen Betrag M größer oder um denselben Betrag kleiner – jeweils mit Wahrscheinlichkeit 1/3.

Martins setzte zu Beginn gleich viele Individuen beider Arten in die virtuelle Umwelt und ließ dann »der Natur« ihren Lauf. Zunächst ließ er die Mutationen außen vor, indem er den Parameter M gleich null setzte. In diesem Szenario sind alle Individuen stets gleich fit, gewinnen also im statistischen Mittel gleich oft den Zweikampf. Die sterbliche Art wird jedoch zusätzlich durch den von selbst eintretenden Tod dezimiert. In der Tat beobachtete Martins in allen Durchläufen seiner Simulation, dass die Sterblichen ausstarben.

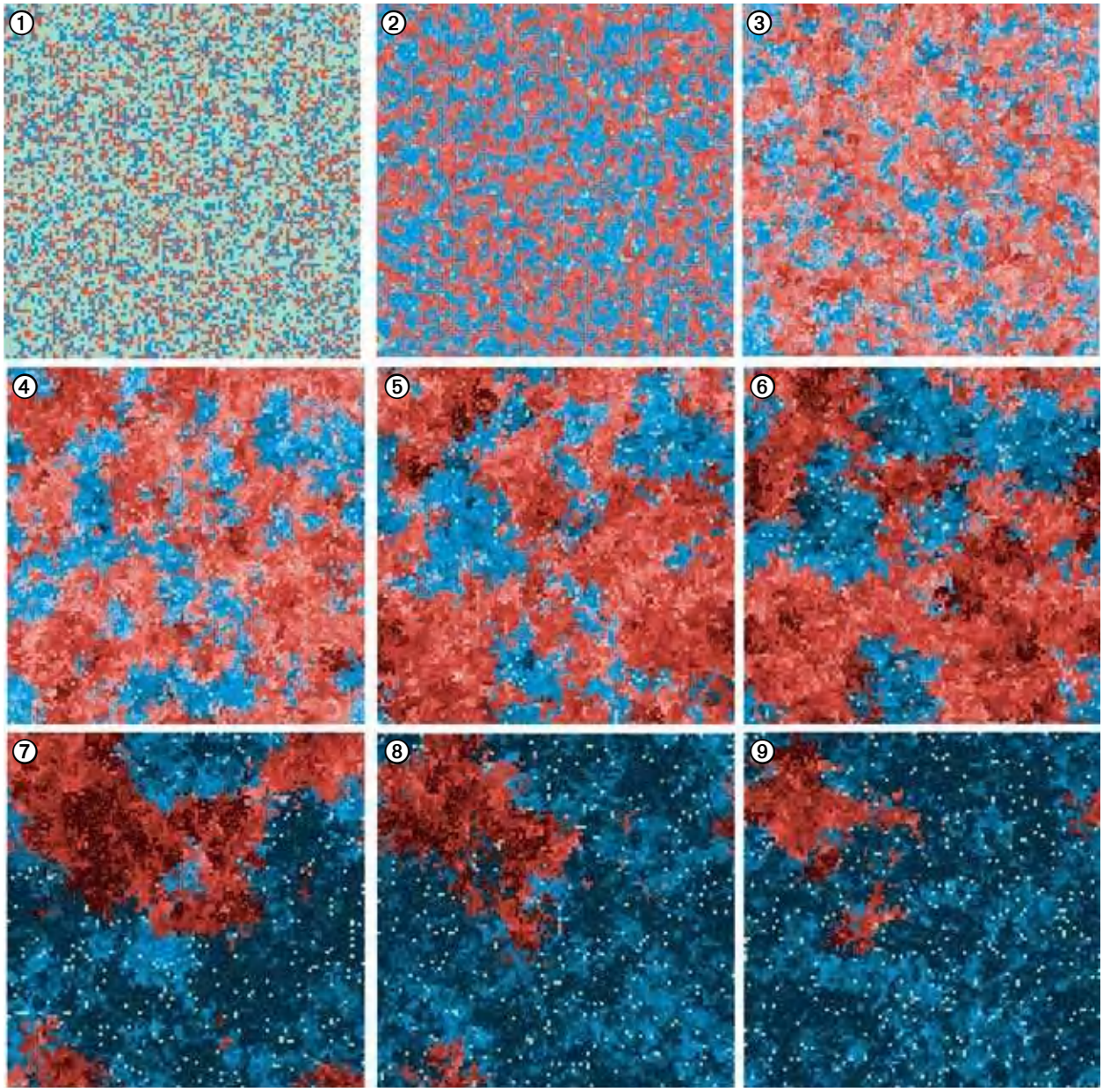
Im nächsten Schritt führte er die Möglichkeit von Mutationen ein, und zwar wieder in gleicher Weise für beide Spezies. Bemerkenswerterweise verschiebt diese scheinbar neutrale Änderung die Verhältnisse zu Gunsten der Sterblichen. Bei einem Mutationsfaktor $M = 0{,}1$ halten sie es bis zum Aussterben im Durchschnitt 1000 Jahre durch anstatt nur 200 Jahre bei $M = 0$. In 7 von 50 Durchläufen gewannen sie gar die Oberhand und verdrängten ihre Konkurrenten vollständig.

Wie ist das zu erklären? Die durchschnittliche Fitness wird durch die Mutationen selbst überhaupt nicht verändert, wohl aber durch die Zweikämpfe. Da in der Mehrzahl der Fälle der Fittere übrig bleibt, steigt die durchschnittliche Fitness mit der Zeit an. Dieser Effekt wird bei den Sterblichen durch deren natürlichen Tod verstärkt; denn die Alten stammen aus einer früheren Zeit, als die Durchschnittsfitness noch geringer war. Durch ihren Tod nimmt also die durchschnittliche Fitness zu. In einer Umwelt, in der ohnehin jedes Jahr die Hälfte der Gesamtbevölkerung

Endsieg für die Sterblichen

Zu Beginn eines typischen Simulationslaufs ① werden gleiche Anzahlen sterblicher (blau) und potenziell unsterblicher Individuen (rot) in dem quadratischen Biotop von 101 mal 101 Feldern ausgesetzt. Sie besetzen zügig die noch freien Gitterplätze (grüne Punkte). Da sich ein Kind in der Nähe seines Elterntiers ansiedelt, entstehen kleine bis mittelgroße Flecken einheitlicher Färbung. Dort konkurrieren die Kunstwesen vorrangig mit ihresgleichen.

Da die sterbliche Spezies durch natürliche (nicht durch Kampf verursachte) Todesfälle Mitglieder verliert, ist sie gegenüber ihrer Konkurrenz zunächst klar im Nachteil (② bis ⑤). Ihre Vertreter sind jedoch durchschnittlich fitter (dargestellt durch Farbtöne: je dunkler ein Punkt, desto fitter das dort ansässige Individuum), holen daher im Verlauf der Zeit stark auf und verdrängen schließlich ihre langlebige Konkurrenz sogar von der Bildfläche (⑤ bis ⑨).



MARTINS, A. C. R.: CHANGE AND AGING SENESCENCE AS AN ADAPTATION. IN: PLOS ONE 6, S. E24328 1–12, 2011, FIG. 1

Zweikämpfen zum Opfer fällt, kann dieser Effekt anscheinend die Verluste durch natürlichen Tod aufwiegen oder sogar überkompensieren.

Es erleichtert der sterblichen Gruppe zusätzlich das Überleben, wenn der Selektionsdruck durch die Umwelt mit ins Modell einbezogen wird. Dazu wird – in grober Vereinfachung der komplexen Realität – in jedem Zeitschritt die Fitness aller Beteiligten um einen konstanten Betrag d vermindert. Die Umwelt verändert sich gewissermaßen so, dass alle Lebewesen schlechter an sie angepasst sind als zuvor.

Schon ab $d = 0{,}01$ wandelte sich im Szenario mit Mutationsfaktor $M = 0{,}1$ das langsame Dahinsiechen der sterblichen Gruppe in ein Unentschieden: Die Siege waren annähernd gleich auf beide Gruppen verteilt.

Erhöhte Martins schließlich die Größe des virtuellen Biotops auf 101 mal 101 Felder, so entschieden die Sterblichen sogar 39 von 50 Simulationen für sich. Das ist so zu erklären: Auf dem größeren Gebiet kämpfen die Tiere in der Frühphase vorrangig gegen ihresgleichen. Wegen ihrer tendenziell höheren Innovationsrate können die Sterblichen ihre Durchschnittsfitness rascher in die Höhe treiben als die potenziell Unsterblichen und sind ihnen daher bei den folgenden Begegnungen überlegen. Darüber hinaus werden Verluste durch natürlichen Tod rascher ausgeglichen, wenn noch Platz für eine Neubesiedlung vorhanden ist.

Der Alterstod kann also ein evolutionärer Vorteil sein, und zwar, weil die Alten durch rechtzeitiges Abtreten den fitteren Jungen nicht nur die Mühe ersparen, sie im Zweikampf aus dem Weg zu räumen, sondern auch das Risiko, dabei selbst zu sterben. Damit eignet sich dieses Modell, um die Entstehung und Aufrechterhaltung der Sterblichkeit im Lauf der Evolution plausibel zu machen – nicht aber für eine Übertragung auf menschliche Gesellschaften. Dazu ist es doch zu stark vereinfacht.

Janina Fischer ist promovierte Chemikerin und Wissenschaftsjournalistin in Mainz.

FLUIDDYNAMIK

Von Wirbelballen zur Turbulenz

Endlich gelang es Forschern, eine mehr als 100 Jahre alte Frage der Strömungsdynamik zu beantworten: Wann gewinnen in Rohrströmungen Turbulenzen die Oberhand?

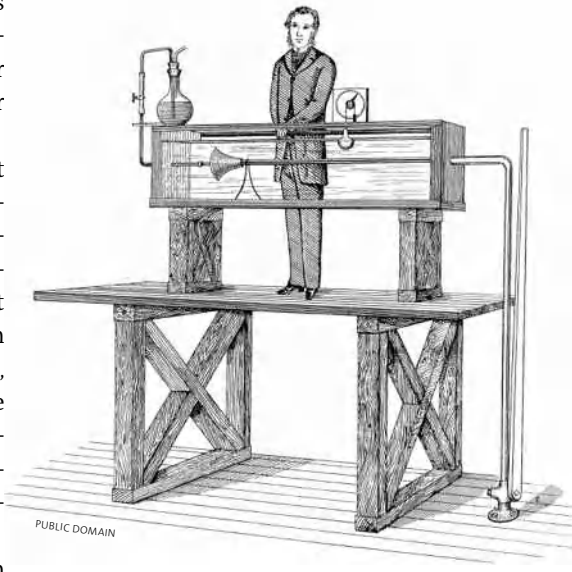
VON KERSTIN AVILA UND BJÖRN HOF

Manch scheinbar simple Frage hat in der Wissenschaft schon Generationen von Forschern beschäftigt, die vergeblich nach der Antwort gesucht, dabei aber fundamentale Erkenntnisse gewonnen haben. Ein gutes Beispiel dafür bietet die Fluiddynamik, die Wissenschaft von der Bewegung von Flüssigkeiten und Gasen. Schon vor über 120 Jahren wollte Osborne Reynolds (1842–1912) an der University of Manchester herausfinden, wann eine Flüssigkeit nicht mehr glatt durch ein Rohr strömt, sondern Wirbel bildet, die den Strömungswiderstand drastisch ansteigen lassen.

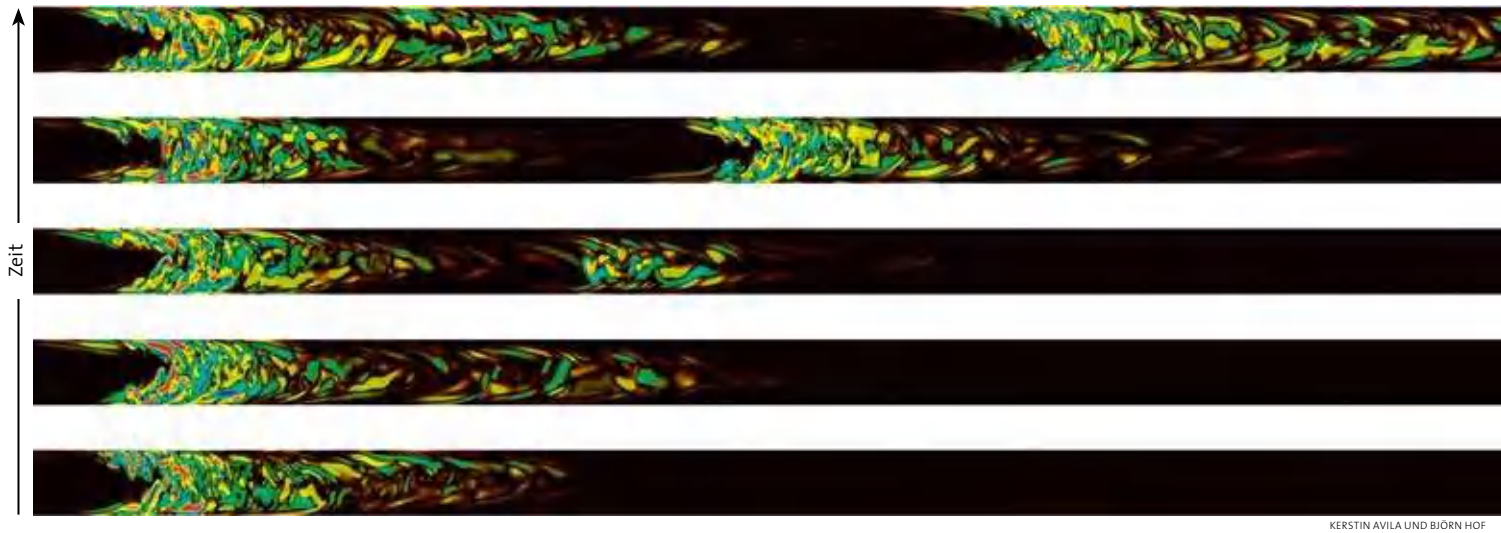
Mit seinen Untersuchungen hat der britische Ingenieur bahnbrechende Fortschritte in der Fluiddynamik erzielt, ohne jedoch seine Ausgangsfrage definitiv beantworten zu können. Das Rätsel blieb bis vor Kurzem ungelöst. Eine vermeintliche Lösung schaffte es zwar in etliche wissenschaftliche Veröffentlichungen, Lehrbücher und sogar in Wikipedia. Doch beruht sie auf einer inkorrekt zitierten Zahl.

In der Fluiddynamik unterscheidet man zwischen laminaren und turbulenten Strömungen. In ersteren bewegt sich die Flüssigkeit glatt in Schichten, die sich nicht vermischen. Meist ist die Strömungsgeschwindigkeit zeitlich konstant. Man denke etwa an Honig, der von einem Löffel fließt. Turbulente Strömungen sind dagegen stark fluktuierend und verwirbelt, was unter anderem zu deutlich höheren Reibungsverlusten führt.

Um den Übergang zwischen den beiden Strömungsarten zu erforschen, wählte Reynolds einen Versuchsaufbau mit möglichst einfacher Geometrie und großer technischer Bedeutung: ein



Auf der historischen Zeichnung ist Osborne Reynolds bei seinen bahnbrechenden Versuchen zur Strömung von Flüssigkeiten in Rohren zu sehen.



KERSTIN AVILA UND BJÖRN HOF

Die Schnappschüsse einer Computersimulation zeigen von unten nach oben, wie aus einem wachsenden Wirbelballen – einem »puff« – ein zweiter hervorgeht. Die Flüssigkeit strömt von links nach rechts.

gerades, glattes Glasrohr mit rundem Querschnitt, durch das er unterschiedlich warmes Wasser strömen ließ.

Durch Einspritzen von Tinte konnte der britische Forscher die Bewegung sichtbar machen und so eindeutig zwischen laminaren und turbulenten Regionen unterscheiden. Wie er feststellte, spielte die Strömungsgeschwindigkeit eine entscheidende Rolle. Erst wenn sie relativ hoch war, bildeten sich Wirbel. Außerdem bemerkte Reynolds, dass ein großer Rohrdurchmesser und eine geringe Viskosität – also Zähigkeit – der Flüssigkeit Turbulenzen begünstigten. Das Verhalten der Strömung hing demnach vom Verhältnis der drei Größen zueinander ab.

Bedeutendes Lebenswerk, doch ohne krönenden Abschluss

Dies führte Reynolds zu dem wichtigsten Parameter der Fluiddynamik: der später nach ihm benannten Reynoldszahl. Die dimensionslose Größe ist gleich dem Produkt aus Strömungsgeschwindigkeit und Rohrdurchmesser, geteilt durch die Viskosität. Auf ihr beruht das reynoldssche Ähnlichkeitsgesetz, wonach es möglich ist, von Beobachtungen an kleinen Modellen – etwa im Windkanal – auf das Verhalten des Originalsystems zu schließen. Dieses Gesetz bildet eine wesentliche Grundlage der experimentellen Strömungsforschung.

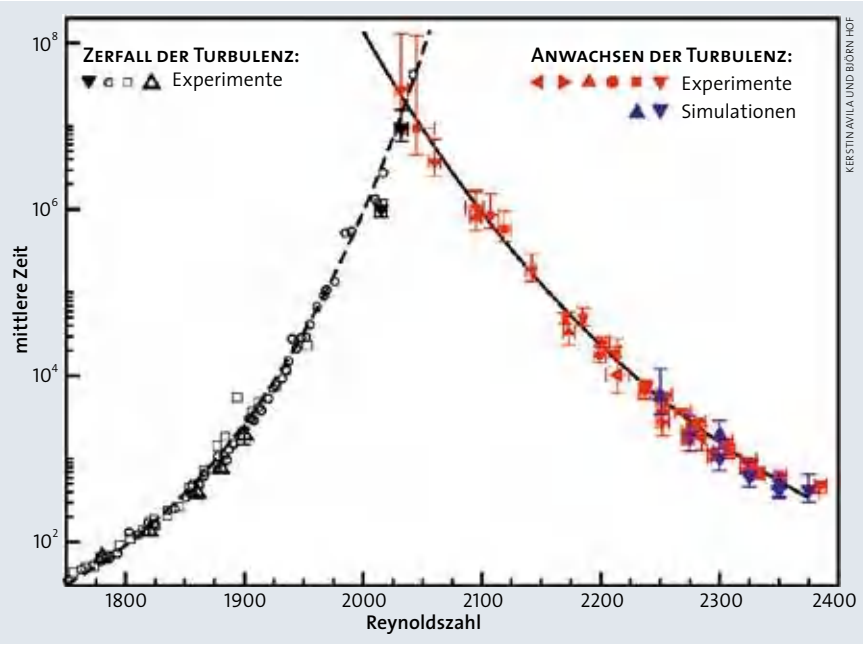
Die Messungen von Reynolds zeigten allerdings auch, dass äußere Störungen – etwa Wellen im Tank, der das Rohr speist – großen Einfluss darauf haben, wann die Turbulenz einsetzt. So konnten Strömungen bei gleicher Reynoldszahl mal verwirbelt und mal laminar sein. Die Frage, ab welcher Geschwindigkeit – bei gegebener Rohrdicke und Viskosität – eine Strömung turbulent wird, hängt somit stark vom Versuchsaufbau ab und lässt sich daher nicht eindeutig beantworten. Reynolds postulierte allerdings, dass es einen kritischen Wert für die Reynoldszahl (Re_c) geben müsse, oberhalb dessen sich vorhandene Wirbel ausbreiten und zu dauerhafter Turbulenz führen, während sie unterhalb dieses Werts zerfallen, so dass die Strömung schließlich in den laminaren Zustand zurückkehrt.

Trotz langjähriger Forschung gelang es dem britischen Forscher aber nicht, diese Zahl zu bestimmen. Seine letzten Schätzungen lagen zwischen 1900 und 2000. In diesem Bereich wird die Strömung nie vollständig turbulent. Vielmehr bleiben zwischen den lokalisierten Wirbelballen, so genannten »puffs«, die eine typische Länge von 20 bis 30 Rohrdurchmessern haben, stets laminare Bereiche bestehen (Bild oben).

Unter der Vielzahl von Versuchen, diesen kritischen Punkt zu bestimmen, fanden Experimente besondere Beachtung, die Julis C. Rotta (1912 – 2005) 70 Jahre später an der Aeronautischen Versuchsanstalt in Göttingen durchführte. Sie galten dem Bereich oberhalb von Re_c, in dem sich die turbulenten Regionen auf Kosten der laminaren ausbreiten. Rotta verfolgte, wie diese Ausbreitungsgeschwindigkeit abnahm, während er die Reynoldszahl allmählich senkte; bei Re_c sollte sie gleich null sein. Doch er kam nie so weit, weil sein Rohr zu kurz war und er nicht genügend Experimente durchführen konnte. Seine letzte Messung bei $Re = 2300$ ergab noch eine Ausbreitungsgeschwindigkeit von zwei Prozent der mittleren Strömung.

Deshalb konnte Rotta das gesuchte Re_c nur extrapolieren. In seiner Veröffentlichung schrieb er: »Der genaue Wert dieser kritischen Reynoldszahl kann aus vorliegenden Versuchen nicht bestimmt werden; er mag bei $Re_c = 2000$ liegen.« Dennoch zitierten viele Wissenschaftler das Ergebnis seiner letzten Messung fälschlicherweise als angebliche Schwelle für den Einsatz der Turbulenz bei der Rohrströmung. Die Zahl 2300 fand so auch Eingang in Lehrbücher und Lexika – darunter Wikipedia.

Da das Problem gelöst schien, beschäftigte sich in der Folge kaum noch jemand damit. Das änderte sich erst, als 2004 theoretische Physiker um Bruno



Ausbreitung und Zerfall von Turbulenzen sind Zufallsprozesse, deren Wahrscheinlichkeit von der Reynoldszahl abhängt. Wo sie sich die beiden Vorgänge die Waage halten – also am Schnittpunkt der beiden Wahrscheinlichkeitskurven –, liegt die kritische Reynoldszahl Re_c, die den Übergang zwischen laminarer und turbulenter Strömung kennzeichnet.

Eckhardt von der Universität Marburg neue Erkenntnisse über das Verhalten der Strömung unterhalb von Re_c vorlegten. Demnach handelt es sich beim Zerfall der Turbulenz im Rohr um einen statistischen Vorgang mit einer exponentiellen Wahrscheinlichkeitsverteilung. Er findet also vollkommen zufällig statt. Genau wie beim Zerfall radioaktiver Substanzen lässt sich aber eine mittlere Zeit angeben, nach der die Turbulenz zur Hälfte zerfallen ist.

Gleichgewicht zwischen Ausbreitung und Zerfall

Die exakte Bestimmung dieser Halbwertszeit für jede Reynoldszahl erfordert allerdings Tausende bis Hunderttausende von Messungen. Viele Forschergruppen auf der ganzen Welt unterzogen sich dieser Mühe – mit teils widersprüchlichen Ergebnissen. Die Hauptschwierigkeit bestand darin, über Zigtausende von Messungen hinweg alle Versuchsbedingungen exakt konstant zu halten. Ziel der Experimente war es, festzustellen, bei welcher Reynoldszahl die mittlere Zerfallszeit unendlich groß wird. Dies sollte das gesuchte Re_c sein. Doch zur großen Enttäuschung der Forscher stiegen die Zerfallszeiten mit zunehmender Reynoldszahl zwar sehr schnell an (linker Ast in Grafik oben), erreichten aber nie unendlich. Somit ließ sich Re_c auf diese Weise nicht bestimmen.

Den Durchbruch brachte schließlich die Erkenntnis, dass sich Turbulenz auch schon bei unerwartet niedrigen Reynoldszahlen ausbreiten kann, indem sich Wirbel von einem existierenden »puff« ablösen und einen neuen bilden (Bild auf S. 17). Wie die Beobachtungen unserer Gruppe an einem 15 Meter langen Glasrohr mit vier Millimeter Durchmesser ergaben, geschieht das jedoch extrem selten. Deshalb bleibt ein turbulenter Bereich oft tagelang unverändert, bevor er plötzlich einen zweiten erzeugt. Wie eine statistische Untersuchung ergab, handelt es sich hierbei ebenfalls um einen Zufallsprozess mit exponentieller Wahrscheinlichkeitsverteilung *(Journal of Fluid Mechanics 646, S. 127, 2010)*.

Folglich lässt sich nicht nur für den Zerfall, sondern auch für die Ausbreitung der Turbulenz eine Halbwertszeit bestimmen. Diese fällt mit sinkender Reynoldszahl sehr schnell ab (rechter Ast in Grafik links). Damit war die Lösung des Problems plötzlich ganz einfach. Offenbar überwiegt bei niedrigen Reynoldszahlen der Zerfall der Turbulenz. Dadurch wird die gesamte Strömung irgendwann wieder laminar. Bei hohen Reynoldszahlen hingegen lösen sich turbulente »puffs« langsamer auf, als neue entstehen. Folglich breitet sich die Turbulenz aus und erfasst schließlich die gesamte Strömung. Der kritische Punkt liegt nun genau dort, wo diese beiden Vorgänge sich die Waage halten, also die Kurven der Halbwertszeiten für Ausbreitung und Zerfall sich schneiden. Das ist bei einer Reynoldszahl von 2040 der Fall *(Science 333, S. 192, 2011)*. Von uns durchgeführte Computersimulationen bestätigten dieses Ergebnis.

Nach über 100 Jahren konnten wir also eine grundlegende Frage der Strömungslehre mit immenser praktischer Bedeutung endgültig beantworten. Eine besonders wichtige technische Anwendung ist der Transport von Flüssigkeiten und Gasen durch Rohre – etwa Erdöl und Erdgas durch Pipelines. Hier sind Turbulenzen unerwünscht, da sie viel Energie kosten. Ein besseres Verständnis ihrer Entstehung könnte Wege aufzeigen, sie mit geringem Energieaufwand im Keim zu ersticken. Allerdings erfordert das noch tiefere Einblicke in den Mechanismus, wie Wirbelflecken sich aufspalten. Daran arbeiten wir am Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation in Göttingen nunmehr mit Nachdruck.

Mathematisch handelt es sich beim Umschlag von laminarer zu turbulenter Strömung übrigens um einen so genannten Nichtgleichgewichtsphasenübergang, der den gleichen Gesetzmäßigkeiten gehorcht wie die Ausbreitung von Waldbränden oder Epidemien.

Kerstin Avila fertigt am Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation in Göttingen ihre Doktorarbeit über das Thema dieses Beitrags an. **Björn Hof**, ihr Betreuer, leitet dort als promovierter Physiker eine Arbeitsgruppe, die über die Entstehung von Komplexität und Unordnung in Strömungen forscht.

ARCHÄOLOGIE

80 Meter antike Philosophie

In der antiken Stadt Oinoanda war die Lehre des Philosophen Epikur allen präsent – dank einer monumentalen Inschrift. Altertumsforschern gewährt sie Einblicke in die Weltanschauung des 2. Jahrhunderts n. Chr.

VON MARTIN LEHRER

Jammern und Klagen kamen für Diogenes, Bürger der lykischen Kleinstadt Oinoanda, wohl nicht in Frage. Im 2. Jahrhundert n. Chr. formulierte er: »Das Leben bietet uns zur Ernährung, obgleich für unsere Natur Gerstenbrot ausreichte, vieles, was bei der Nahrungsaufnahme keine Unlust erregt, und ein Lager, das sich nicht gegen den Leib durch seine Härte auflehnt, und Kleidung, die zwar nicht allzu weich ist, aber auch nicht rau.«

Lebensweisheiten, aber auch Traktate zur Natur- und Verhaltenslehre ließ Diogenes in die Wand einer Säulenhalle meißeln, um – das lässt sich herauslesen – seinen Mitmenschen geistige Medizin zu schenken. 80 Meter lang und gut und gerne vier Meter hoch, suchte diese Inschrift in der antiken Welt ihresgleichen.

Vermutlich brachte ein Erdbeben sie zum Einsturz; die Bruchstücke wurden in der Stadt wiederverbaut. Nachdem der Ort um das 8. Jahrhundert aufgegeben wurde, blieben seine Ruinen mehr als 1000 Jahre unberührt – ein Glücksfall für die Archäologie. Ende des 19. Jahrhunderts untersuchten französische Wissenschaftler die Stätte, die heute in der Südwesttürkei gut zwei Autostunden westlich von Antalya liegt und nach wie vor nur mit Mühe zu erreichen ist. Sie entdeckten Fragmente der Inschrift. Seitdem ist diese ein Thema für österreichische, britische und seit 2007 auch für deutsche Altertumsforscher.

Manche Fragen sind noch offen, sicher aber ist: Diogenes von Oinoanda war Anhänger der Philosophie des Atheners Epikur (341 – 271 v. Chr.). Das

Praktisches aus dem Lesershop

Sammelkassette

Die Sammelkassette von **Spektrum der Wissenschaft** bietet Platz für 12 bis 15 Hefte und kostet € 9,50 (zzgl. Versand).

Jahrgangs-CD-ROM SdW 2011

Die CD-ROM bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bilder) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Diese sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche ab der Erstausgabe 1978. Die CD-ROM läuft auf Windows-, Mac- und Unix-Systemen (der Acrobat Reader wird mitgeliefert).
Des Weiteren finden Sie das **Spektrum.de**-Archiv mit zirka 11 000 Artikeln. **Spektrum.de** und das Suchregister laufen nur unter Windows.
Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,– (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland); erhältlich ab Ende Februar 2012.
ISBN 3-978-941205-92-5

Spektrum DER WISSENSCHAFT
WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

online: spektrum.de/lesershop
E-Mail: service@spektrum.com
Tel.: 06221 9126-743

Fax: 06221 9126-751
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg

belegen Zitate aus dessen Werk wie auch Überlegungen gemäß Epikurs Denkschule. So hatte dieser gefordert, sich auf das Hier und Jetzt zu fokussieren, da es keine Daseinsform nach dem Tod gebe. In diesem Sinn formulierte Diogenes: »Der Tod ist zu verlachen, da er einer Maske gleicht, die Kinder erschreckt.«

Ungewöhnlich an der Wandinschrift sind nicht allein ihre Ausmaße. Denn zum einen lag die Blütezeit der Epikuräer bereits 400 Jahre zurück, zum anderen gehörte Diogenes nicht zur typischen Zielgruppe jener Philosophie, hatte ihr Urheber doch Wohlstand wie auch politische Betätigung, ja jegliche öffentliche Zurschaustellung abgelehnt. Das stand gerade in römischer Zeit im Gegensatz zum Selbstverständnis der gebildeten Schichten – und damit auch im Widerspruch zur gesellschaftlichen Stellung des Diogenes.

Dieser gehörte offenkundig zu einer der führenden und vermögenden Familien. Vermutlich beschränkte er seine öffentlichen Aktivitäten auf das notwendige Minimum. Da er aber bei seinen Mitbürgern einen Bedarf an geistiger Anleitung sah, hoffte er diese durch das Monument zu geben, ohne persönlich in Erscheinung treten zu müssen. Das meint jedenfalls der Altphilologe Martin Ferguson Smith, emeritierter Professor der englischen Durham University, der seine Forschung der Diogenes-Überlieferung gewidmet hat.

Im Oktober 2011 endete eine Serie von fünf Begehungskampagne (Surveys), die das Deutsche Archäologische Institut (DAI) Istanbul gemeinsam mit dem Institut für Altertumskunde der Universität zu Köln organisiert hat. Es galt, weitere Bruchstücke zu finden, frei zu legen und zu dokumentieren sowie die architektonische Grundstruktur der Stadt zu erfassen. Dazu holte Survey-Leiter Martin Bachmann Architekten von der Universität Karlsruhe (Karlsruher Institut für Technologie) ins Boot. Diese zeichneten wichtige Ruinen und Plätze – beispielsweise die hellenistische Stadtmauer mit ihren Wehrtürmen, die Reste einer byzantinischen Kirche sowie die Agora aus römischer Zeit. Jeder herumliegende Stein war in seiner derzeitigen Position festzuhalten – und zwar so, dass seine Zugehörigkeit zu architektonischen Strukturen erkennbar wird. Mit einem Laserscanner wurden Geländestrukturen erfasst und sozusagen als Pausvorlage unter die Zeichenblätter gelegt, um die Bauaufnahme zu beschleunigen.

Auch bei der Dokumentation der Inschrift kam diese Technik neben klassischen Methoden wie Zeichnung, Abklatsch – ein Abdruck mit angefeuchtetem Papier (siehe Foto oben) – und Fotografie ins Spiel. Durch dreidimensionale Punktgitter repräsentiert, sollten sich die Bruchstücke wie ein Puzzle am Computer zusammensetzen lassen. Zudem wurde die beschriebene Seite

MARTIN LEHRER

Mit Hilfe von angefeuchtetem und auf den Stein gepresstem Karton entstehen Kopien der Fundstücke, so genannte Abklatsche.

Überwacht von Surveyleiter Dr. Martin Bachmann (links) wird ein Inschriftenblock mit dem Flaschenzug für den Abtransport angehoben.

MARTIN LEHRER

mit höherer Auflösung aufgenommen, um mit bloßem Auge kaum zu erkennende Vertiefungen, die ein Schriftzeichen oder ein Teil eines solchen sein könnten, sichtbar zu machen.

Mehr als 70 Fragmente – vom handtellergroßen Bruchstück bis zum mehrere hundert Kilogramm schweren Block – haben die Forscher geortet und dokumentiert. Damit erreicht die Gesamtzahl der Inschriftensteine fast 300. Dennoch sind auch damit nur zwischen 20 und 25 Prozent des gesamten Textes zurückgewonnen. Philologen haben die Schriftmenge einzelner Fragmente auf die vermutete Gesamtfläche der Inschrift hochgerechnet und kamen auf rund 25 000 Worte.

»Wir haben heute ein wesentlich genaueres Bild über die Person Diogenes und sein Denken«, konstatiert Jürgen Hammerstaedt, Professor für Altphilologie an der Universität zu Köln. So seien etliche Hinweise auf vornehme Familien der Zeit aufgetaucht, was dabei hilft, unter den insgesamt 18 in Inschriften der Stadt Oinoanda als Diogenes bezeichneten Personen den Urheber der philosophischen Wandtexte zu identifizieren.

Lettern in lesefreundlicher Größe

Hammerstaedt gemäß schrieb der Autor für die damalige Zeit ungewöhnlich weitschweifig. Der Altphilologe sieht darin ein Indiz, dass Diogenes nicht nur die Oberschicht seiner Stadt ansprechen wollte. Immerhin beherrschten Schätzungen zufolge 10 bis 25 Prozent der Stadtbevölkerung die Kunst des Lesens. Wie sehr Diogenes an sein Publikum dachte, zeigte sich auch in einer variierenden Größe der Buchstaben: Im unteren Bereich der ursprünglich wohl gut vier Meter hohen Wand ließ er Lettern von 1,8 Zentimeter Höhe schlagen, darüber waren sie 2,3, schließlich drei Zentimeter hoch. Philologen vermuten, dass Letztere von unten betrachtet dennoch schlecht zu lesen gewesen waren. Möglicherweise hatte Diogenes die Buchstaben deshalb zusätzlich ausmalen lassen.

Nach wie vor herrscht Ungewissheit über den genauen Standort der Säulenhalle. Südlich und nördlich des Hauptplatzes von Oinoanda haben die Archäologen Fundamente in Frage kommender Gebäude nachgewiesen. Genauer könnten das nur Grabungen ermitteln, doch die türkischen Behörden stellen hohe Anforderungen wie eine Projektlaufzeit von zehn Jahren, eine Anwesenheitspflicht des Grabungsleiters von mindestens zwei Monaten pro Jahr sowie die Rekonstruktion architektonischer Strukturen vor Ort. Den Archäologen Michael Heinzelmann von der Universität zu Köln reizt die Aufgabe dennoch: »Andernorts ist nur noch wenig antike Bausubstanz vorhanden. In Oinoanda sind viele Gebäude nur eingestürzt, man bräuchte die Steinblöcke nach Untersuchung und Dokumentation nur wieder aufeinanderzusetzen.«

Martin Lehrer ist Fachjournalist für Geschichte und Archäologie in Köln sowie Redaktionsleiter der kommunalpolitischen Zeitschrift »Städte- und Gemeinderat«.

NANOPHOTONIK

Kristallspiegel zeigt verborgene Atome

Die klassische Absorptionsspektroskopie mit Röntgenstrahlung versagt, wenn schwerere Elemente im Inneren einer Probe leichte Atomsorten wie Kohlenstoff abschirmen. Finnische Wissenschaftler entwickelten deshalb eine Spektroskopie mit inelastischer Röntgenstreuung.

VON CHRISTIAN G. SCHROER

Ein Beinbruch als Folge eines Unfalls, Gepäckkontrollen am Flughafen – weil Röntgenlicht tief in das zu untersuchende Objekt eindringt, vermag es, innere Strukturen sichtbar zu machen. Das Bild, das auf einem Röntgenfilm oder -chip entsteht, offenbart jene Bereiche, von denen die Strahlung absorbiert wurde. Je dicker der Gegenstand und je schwerer die Elemente, aus denen er besteht, desto energiereicher muss sie sein. Damit erkauft man sich aber einen oft unerwünschten Nebeneffekt: Leichte Atomsorten zeichnen sich kaum noch im Bild ab, denn sie entnehmen diesem Licht um mehrere Größenordnungen weniger Energie. Was aber, wenn das Interesse gerade ihnen gilt?

Beispielsweise kommen Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff in natürlichen wie künstlich hergestellten Materialien häufig vor, etwa in modernen Verbundwerkstoffen. Wenn Wissenschaftler klären wollten, wie diese leichten Atomsorten in eine Umgebung aus schwereren eingebunden sind, mussten sie ihre Proben aufschneiden und die Schnittflächen mikroskopisch untersuchen. Ein zerstörungsfreies Verfahren bei solchen Fragestellungen wäre eigentlich die Absorptionsspektroskopie: Forscher durchleuchten eine Probe und messen im austretenden Licht, bei welchen Wellenlängen in welchem Maß Energie entnommen wurde. Denn jedes Element zeigt ein charakteristisches Absorptionsverhalten, anhand dessen sich sogar chemische Bindungen unterscheiden lassen. Die interessanten Anregungen bei den drei genannten leichten Atomsorten liegen aber im Bereich so ge-

Das Weltall wimmelt von Wohnstätten

Fast jeder Stern hat mehrere Begleiter.

Der Himmel ist hier zu Lande oft bedeckt, sternenklare Nächte erlebt man im Frühjahr selten. Außerdem wohnt unsereins zumeist in Städten, wo künstliches Licht die Sterne überstrahlt. Nicht nur deswegen hat das Himmelszelt seinen Rang als Projektionsfläche des herrschenden Weltbilds eingebüßt. Einst wölbte es sich als Domkuppel über dem irdischen Jammertal, dem Schauplatz von Sündenfall, Kreuzestod und Jüngstem Gericht. Als Giordano Bruno im 16. Jahrhundert die Unendlichkeit der Welten predigte, ließ die römische Kirche den Ketzer verbrennen.

Für Kant, den deutschen Philosophen der Aufklärung, war das Firmament zwar nicht mehr Gegenstand religiöser Betrachtung, aber immer noch staunenswert: »Der bestirnte Himmel« erfüllte sein »Gemüt mit immer neuer und zunehmender Bewunderung und Ehrfurcht, je öfter und anhaltender sich das Nachdenken damit beschäftigt.« Hingegen findet wenig später der Philosoph Hegel am Sternenhimmel überhaupt nichts Erhabenes; er vergleicht ihn mit einem Ekzem und einem Insektenschwarm: »Dieser Licht-Ausschlag ist so wenig bewundernswürdig, als einer am Menschen, oder als die Menge von Fliegen.«

Im 20. Jahrhundert schlägt die Stunde der astronomischen Tragiker. Das Weltall erscheint in populären Darstellungen wüst und leer, eisig und lebensfeindlich. Für den französischen Biologen Jacques Monod ist die Entstehung von Leben ein so extrem unwahrscheinlicher Zufall, dass wir uns zwischen den Sternen mutterseelenallein fühlen müssen. Unsere Existenz erscheint Monod so absurd wie seinem Landsmann, dem Schriftsteller Albert Camus.

Darum werden Hegelianer und Existenzialisten meine Begeisterung über einen soeben erschienenen Artikel kaum verstehen, der sich mit der Häufigkeit von Planetensystemen im All befasst. Ein multinationales Astronomenteam hat in jahrelanger Arbeit Millionen Sterne danach untersucht, ob sie von Planeten umkreist werden *(Nature 481, S. 167–169, 2012)*.

Die Forscher nutzten dabei den Mikrogravitationslinsenffekt. Ein Stern krümmt mitunter durch seine Schwerkraft das Licht eines leuchtenden Hintergrundobjekts und kann dessen Strahlung wie eine Linse bündeln und verstärken. Wird dieser Stern von Planeten umkreist, verrät sich das durch winzige Schwankungen des Linseneffekts. Auf diese Weise konnten die Astronomen erstmals eine recht zuverlässige Planetenstatistik aufstellen. Das Fazit: Planeten sind im All die Regel, nicht die Ausnahme. Unser Sonnensystem hat unzählige Geschwister.

Damit steigt natürlich auch die Wahrscheinlichkeit erdähnlicher Planeten, die ihr Zentralgestirn in einem Abstand umrunden, der Leben zulässt. Im Licht dieses Resultats bietet der Nachthimmel nicht mehr nur den Anblick einer leblosen Sternenwüste, eines kalten Vakuums mit darin verstreuten Staub- und Gaswolken. Die Lichtpunkte signalisieren Orte, um die unsichtbar die unterschiedlichsten Gebilde wandern – manche gasförmig, die meisten nicht für lebende Organismen geeignet. Aber angesichts der Unzahl der Sterne und Planeten gibt es unter ihnen sicher auch solche, die Leben beherbergen.

Wir müssen uns also an den paradoxen Gedanken gewöhnen, dass das Weltall trotz allem ein wohnlicher Ort ist. Weil es aber so dünn besiedelt ist, werden wir niemals mit den intelligenten Wesen, die irgendwo da draußen zu ihrem Himmel aufschauen, in Dialog treten können. Auch sie kommen wohl irgendwann zu dem Schluss, dass sie nicht allein im Universum sind – und dass sie dennoch für immer einsam bleiben müssen.

Michael Springer

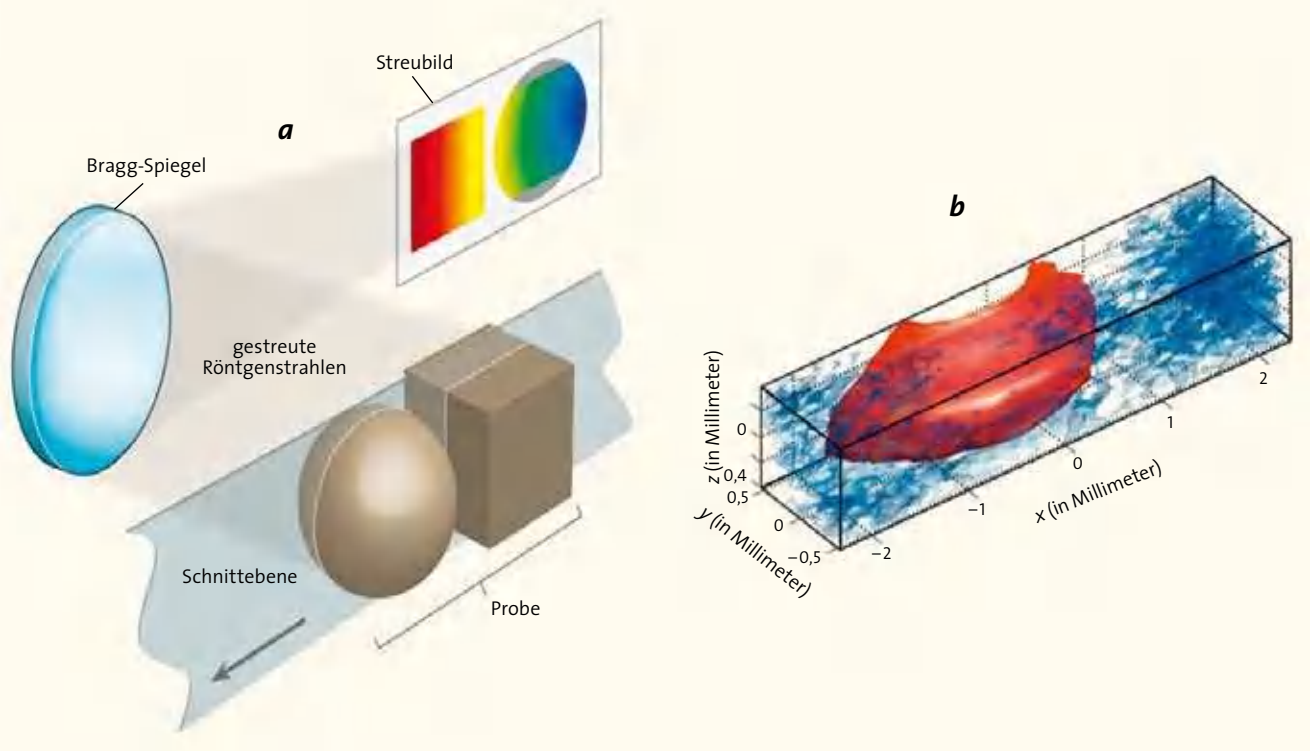
nannter weicher, das heißt energiearmer Röntgenstrahlung. Doch diese dringt nicht weiter als einige tausendstel Millimeter in das Material ein.

Wissenschaftler um Simo Huotari von der Universität Helsinki haben eine trickreiche Lösung erdacht, um leichte Elemente auch in wesentlich dickeren Proben zu beobachten: Mit hartem, also energiereichem Röntgenlicht, das mehrere Millimeter unter die Oberfläche gelangt, bestrahlen sie eine Probe, messen aber nicht, was auf geradem Weg hindurchdringt und auf der anderen Seite wieder herauskommt, sondern analysieren das Spektrum der seitlich gestreuten Strahlung.

Umfassende Information dank unvollständiger Absorption

Die harte Röntgenstrahlung regt leichte Elemente durchaus an, führt also ihrer Elektronenhülle Energie zu. Weil sie aber viel mehr Energie enthält, als für die Anregung eines Elektrons nötig ist, wird sie nicht vollständig absorbiert. Die Photonen übertragen stattdessen nur einen kleinen Teil und werden seitlich abgelenkt; man spricht deshalb von inelastischer Streuung. Bei welchen Wellenlängen und in welchem Maß die Anregung geschieht, hängt wieder vom Element und seiner chemischen Umgebung ab. Diese Informationen lassen sich aus dem Spektrum der Streustrahlung gewinnen.

Bei dem neuen Verfahren fällt das Licht durch einen Spalt und durchdringt die Probe entlang einer dünnen Schnittebene (siehe Grafik rechts). Die verschiedenen Elemente streuen es in alle möglichen Richtungen. Um daraus nur jenes herauszufiltern, das von einer Atomsorte in einer bestimmten Umgebung stammt, verwenden die Forscher einen Bragg-Spiegel. Das ist ein Kristall, der Licht je nach dessen Wellenlänge in eine bestimmte Richtung reflektiert. Fällt es auf einen Fotodetektor, sieht dieser also nur eine schmale Energieband aus dem gesamten Streuspektrum. Auf dem Messgerät erscheint dann ein direktes Bild der Bestandteile entlang der Schnittebene, von denen diese Strahlung ausgeht – also ein Bild



SCHROER, C. G.: THE CHEMISTRY INSIDE. IN: NATURE 476, S. 159–160, 2011, FIG. 1

Das neue Röntgenverfahren beleuchtet eine dünne Scheibe der Probe. Deren innere Strukturen streuen die Strahlung auf einen Kristall, der nur Licht einer bestimmten eingestellten Energie auf eine Röntgenkamera reflektiert. Dort entsteht dann ein Bild vom Inneren der Probe, das nur vom Signal eines ausgewählten Elements und seiner chemischen Bindungen stammt (*a*). Die Technik kann sogar zwei Bindungsarten reinen Kohlenstoffs unterscheiden: Abbildung (*b*) zeigt einen Ausschnitt einer Probe, in der ein Diamant (rot) in Graphit (blau) eingebettet ist.

der leichten Elemente. Die verschiedenen Signaturen einer Atomsorte, die in ihrem Vergleich Aufschlüsse über die jeweiligen chemischen Bindungen geben, vermessen die Forscher dann, indem sie die Energie der einfallenden Strahlung verändern – das ist einfacher, als bei konstanter Energie den Spiegel über alle möglichen Winkel zu drehen. Schrittweises Verschieben der Probe erzeugt schließlich eine Datenmenge, aus der ein dreidimensionales Modell ihrer inneren Struktur rekonstruiert werden kann. Der Kontrast im Bild entsteht nicht durch verschieden starke Absorption wie beim klassischen Röntgenbild, sondern durch die Art der chemischen Bindung zu den Nachbaratomen. Keine andere Methode kann das Innere einer Probe auf eine solche Weise abbilden.

Dieses Prinzip demonstrierten die Forscher an einem mit Graphit umhüllten Diamanten. Anhand der unterschiedlichen Spektren der inelastisch gestreuten Röntgenstrahlung ließen sich die beiden Kohlenstoffgitter mühelos auseinanderhalten.

Das betreffende Streusignal ist sehr schwach, daher benötigt die neue Abbildungstechnik die stärksten verfügbaren Quellen für Röntgenstrahlen. Für ihre Experimente arbeiteten die Forscher deshalb an der Europäischen Synchrotronstrahlungsquelle (ESRF) in Grenoble (Frankreich). Dort laufen Elektronen in einem Speicherring mit etwa 840 Meter Umfang nahezu lichtschnell im Kreis und senden dabei intensive Röntgenstrahlung aus.

Europaweit erzeugen nur etwa 20 Forschungseinrichtungen Synchrotronstrahlung. Sie ist daher begehrt und teuer und wird nur für ausgewählte Proben und Experimente verwendet – prominentes Beispiel war die Himmelsscheibe von Nebra, die Forscher am Elektronenspeicherring BESSY II in Berlin untersuchten. Doch auch mit dieser Einschränkung birgt die neue Abbildungstechnik Potenzial für viele Anwendungen in Industrie und Wissenschaft. So ließen sich mit ihr chemische Reaktionen in geschlossenen Behältnissen verfolgen, die Wanderung von Lithiumionen – einer extrem leichten Atomsorte – im Inneren einer Batterie beobachten oder unterschiedliche Phasen (homogene Bereiche) in Kunststoffmischungen abbilden. Sogar Einschlüsse in Fossilien oder in außerirdischem Gestein könnten Forscher aufspüren, ohne die wertvollen Proben zerstören zu müssen. Für lebende Zellen und andere empfindliche Proben ist diese Strahlung allerdings zu intensiv – bei den im Moment noch erforderlichen stundenlangen Belichtungszeiten würde sie die Strukturen zu stark beschädigen. Die Forscher arbeiten aber bereits daran, die Empfindlichkeit ihrer Methode zu steigern.

Christian G. Schroer ist seit 2006 Professor für Strukturphysik der kondensierten Materie an der TU Dresden.

Immuntherapie gegen Krebs

Im Sommer 2010 wurde der weltweit erste therapeutische Krebsimpfstoff in den USA zugelassen. Der Vakzine gegen Prostatakarzinome könnten bald andere folgen.

Von Eric von Hofe

Operation, Chemotherapie, Bestrahlung – das waren bisher die drei Hauptwaffen gegen Krebs. Deren oft schwere Nebenwirkungen lassen sich dank des inzwischen immer gezielteren und besser auf den einzelnen Patienten abgestimmten Vorgehens begrenzen, bei gleichzeitig größerem Therapieerfolg. Es gibt zudem heute schon einige Medikamente, die recht spezifisch die entarteten Zellen angreifen und nicht zu den Chemotherapeutika im engeren Sinn zählen: etwa Herceptin (Trastuzumab), das insbesondere bei einer bestimmten Form von Brustkrebs eingesetzt wird; oder Glivec (Gleevec/Imatinib), womit Ärzte unter anderem eine Leukämieart bekämpfen. Überlebte vor 30 Jahren die Hälfte der Patienten mit invasiv wachsenden Tumoren länger als fünf Jahre, so sind es heute immerhin zwei Drittel. Allerdings haben viele von ihnen noch immer keine normale Lebenserwartung.

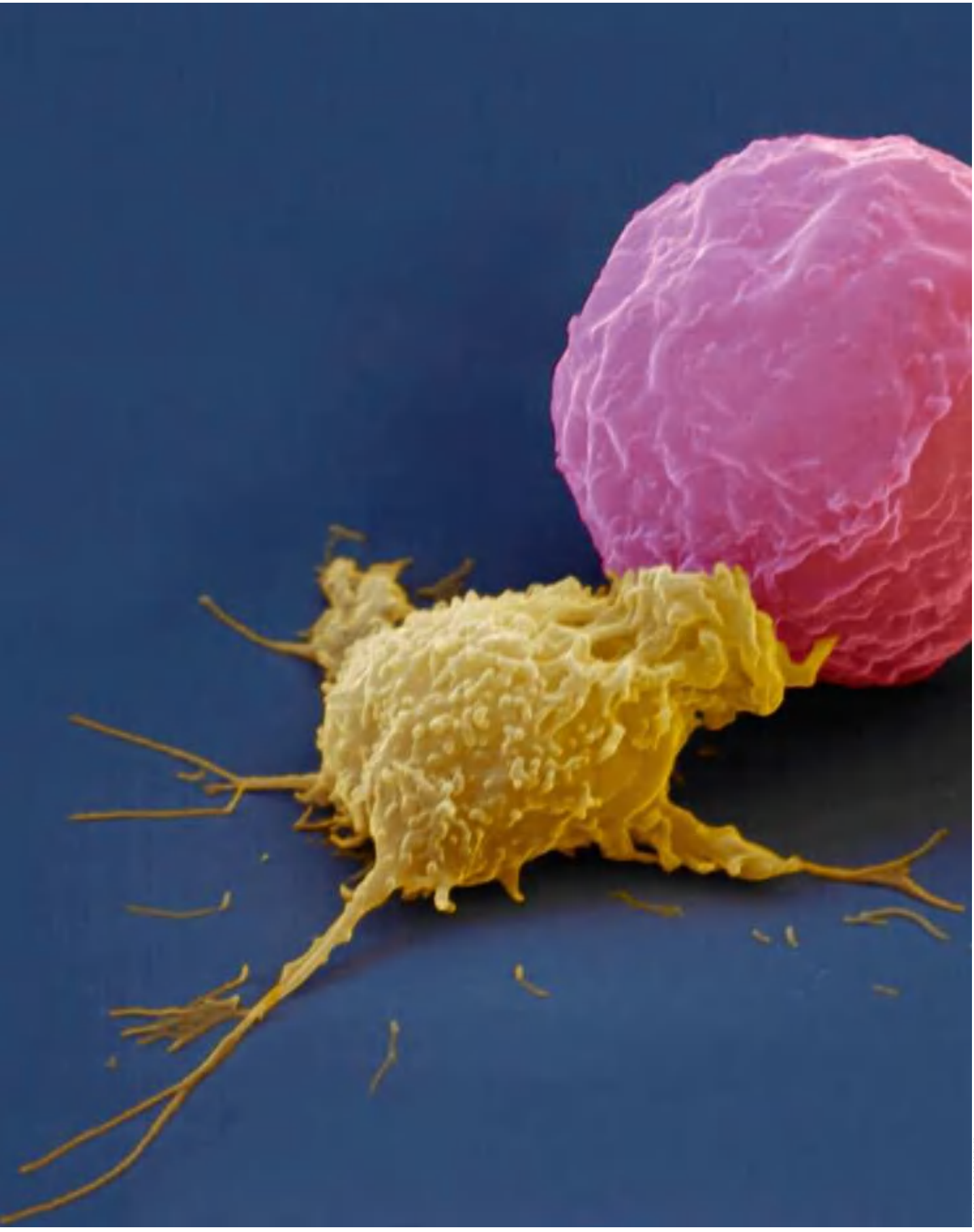
Seit Langem schon überlegen Forscher, dass sich die Aussichten von Krebskranken deutlich verbessern würden, wenn es gelänge, ihr Immunsystem gezielt anzustacheln – als zusätzliche Maßnahme neben den bewährten Behandlungen, die außerdem selbst keine schweren Nebenwirkungen haben dürfte. Doch die Studien der letzten Jahrzehnte enttäuschten meist. Vorübergehend hatten Mediziner beispielsweise große Hoffnung auf das Immunmolekül Interferon gesetzt. Es sollte die körpereigene Abwehr anregen und damit helfen, viele oder sogar alle Krebserkrankungen zu besiegen. Diese hohe Erwartung schwand in den 1980er Jahren bald wieder. Interferon hat zwar in der Krebstherapie inzwischen seinen festen Platz – aber es ist kein Allheilmittel. Auch in den letzten zehn Jahren gab es zahlreiche klinische Studien zu den unterschiedlichsten Ansätzen, einen bestehenden Krebs durch – therapeutisches – Impfen zu behandeln. Keiner davon überzeugte.

Die eine Wunderwaffe haben Forscher zwar immer noch nicht gefunden. Aber die Phase des blinden Vortastens und vergeblichen Probierens könnte bald überwunden sein. Im Sommer 2010 ließ die US-Behörde FDA (Food and Drug Administration) den weltweit ersten therapeutischen Krebsimpfstoff für fortgeschrittene Prostatakarzinome zu: Provenge (Sipuleucel-T). Zwar heilt auch dieses Medikament nicht. Doch einige hundert schwer krebskranke Männer, die es zusammen mit einer üblichen Chemotherapie erhielten, gewannen dadurch immerhin ein paar zusätzliche Lebensmonate.

Die Wende kam, als Forscher einige Grundannahmen zur Immunabwehr von Krebszellen einerseits und zu deren Gegenmanövern andererseits überprüften. Die Ergebnisse dieser Arbeiten bewerten die Experten inzwischen vorsichtig optimistisch. Mit dem neuen Wissen könnte es nun doch endlich gelingen, sehr spezifisch wirksame immunverstärkende Therapien zu entwickeln, die sich routinemäßig zusammen mit den klassischen Behandlungsmethoden einsetzen lassen. Und die Nebenwirkungen sollten höchstens den Symptomen eines heftigen grippalen Infekts ähneln.

Die meisten herkömmlichen Impfungen werden vorbeugend verabreicht. Sie zielen darauf ab, Infektionskrankheiten und deren mitunter verheerende Langzeiteffekte von vornherein zu unterbinden – wie die bleibenden Schäden einer Kinderlähmung, Hirndefekte durch Masern oder Leberkrebs infolge einer Hepatitis-B-Infektion. Eine so genannte therapeutische Impfung indessen richtet sich gegen eine schon bestehende Erkrankung. Im Fall von Krebs wäre das Ziel, das

Ein T-Lymphozyt (eine Klasse von Immunzellen, gelb) attackiert eine Krebszelle. Er erkennt sie an bestimmten Molekülen – Antigenen – auf ihrer Oberfläche.



AG. FOCUS / EYE OF SCIENCE

Immunsystem darauf zu trainieren, die unerwünschten Zellen überall im Körper zu erkennen und anschließend zu zerstören, und das selbst noch Jahre später.

Bei vielen vorbeugenden Impfungen bildet unser Immunsystem schlicht Antikörper gegen den Erreger. Gewöhnlich genügt das, um die betreffende Infektionskrankheit zu verhindern. Die Antikörper lagern sich dann beispielsweise an Grippeviren an, und diese können sich nun nicht weiter vermehren. Um Krebszellen abzutöten, reichen Antikörperreaktionen jedoch gewöhnlich nicht aus. Vielmehr muss das Immunsystem dazu seine T-Zellen – T-Lymphozyten – rekrutieren. Bei diesen weißen Blutkörperchen unterscheiden die Forscher unter anderem zwei Haupttypen: CD4- und CD8-Zellen, so benannt nach bestimmten Rezeptorproteinen außen auf den T-Zellen. Gerade CD8-Lymphozyten können Krebszellen effektiv und direkt vernichten – vorausgesetzt, sie sind dafür geschult, solche Zellen als entartet zu erkennen (siehe Kasten S. 29).

Frühe Versuche mit Bakteriengiften

Allerdings entstand der Wunsch, Krebs mit Impfung zu bekämpfen, lange bevor solche Feinheiten entdeckt wurden. Als »Vater der Krebsimmuntherapie« gilt der amerikanische Arzt William B. Coley (1862–1936). Schon Ende des 19. Jahrhunderts, als noch keine Rede von irgendwelchen T-Zellen war, verabreichte er Krebspatienten Bakterientoxine. Denn er hörte von Kranken, deren bösartige Wucherungen nach einer schweren bakteriellen Infektion offenbar verschwanden. Das versuchte er mit Impfreaktionen nachzuahmen. Coley verwendete ein Präparat von zwei lebensgefährlichen und deswegen abgetöteten Erregern. Davon bekamen die Patienten sehr hohes Fieber. Sie erhielten täglich eine höhere Dosis des Toxingemischs injiziert, denn der Forscher vermutete, die Fieberattacken könnten die darniederliegende Immunabwehr der Kranken reaktivieren und dazu bringen, auch die Krebsgeschwülste als unerwünscht zu erkennen und zu bekämpfen. Bei einem beachtlichen Teil der Patienten zeitigte diese drastische Behandlung tatsächlich sehr guten Erfolg. Coleys Ansicht, die Impfung mit den Bakterientoxinen hätte den Heilungsprozess ausgelöst, war wohl durchaus berechtigt.

Doch es gab auch Widerstand gegen die Methode seitens der Fachkollegen. Andere Behandlungsmöglichkeiten kamen auf, etwa Anfang des 20. Jahrhunderts die Bestrahlung. Als Chemotherapien in den 1950er Jahren immer konsistentere Therapieergebnisse erzielten, verloren Mediziner vollends das Interesse an Coleys Ansatz. Überhaupt geriet die Idee, Krebs durch Impfen zu bekämpfen, völlig in den Hintergrund.

Wissenschaftliche Studien zur Bedeutung des Immunsystems bei Krebs gab es jedoch weiterhin. Mit solchen Forschungen erkannten Mediziner nun auch, dass der deutsche Arzt Paul Ehrlich (1854–1915) wohl 1909 mit seiner These Recht gehabt hatte, wonach die Abwehr normalerweise ständig darüber wacht, ob irgendwo im Körper Krebszellen auftreten. Diese Vorstellung bekam in den 1980er Jahren zusätzlichen Rückhalt, als klar wurde, wie oft bei Zellen im Körper potenziell gefährliche Spontanmutationen auftreten. Demnach müsste Krebs eigentlich sehr viel häufiger vorkommen, als es tatsächlich der Fall ist.

Nach den Beobachtungen bleibt das Immunsystem tatsächlich auch dann nicht untätig, wenn ihm einmal ein Tumor durchschlüpft. Nur kann es später oftmals nicht mehr genug erreichen. Pathologen sagen manchmal, Tumoren seien »Wunden, die nicht heilen« – wissen sie doch schon lange, dass Krebsgeschwülste oft mit Immunzellen durchsetzt sind. Weitere Untersuchungen ergaben aber auch, dass, je größer ein Tumor wird, er umso mehr Substanzen freisetzt, mit denen er die Aktivität von T-Lymphozyten regelrecht unterdrückt. Könnten Krebsimpfungen an dieser Stelle ansetzen? Wie ließen sich die Kräfteverhältnisse so beeinflussen, dass T-Zellen doch noch die Oberhand gewinnen?

Langer Weg zum Erfolg

Seit mehr als 100 Jahren versuchen Forscher, das Immunsystem gegen Krebs anzustacheln.

1890er Jahre
William B. Coley injiziert Krebspatienten einen Extrakt aus abgetöteten Bakterien.

1909
Paul Ehrlich (Bild) vertritt die These, das Immunsystem könne Tumorwachstum unterdrücken.

1975
Gezielte Herstellung monoklonaler Antikörper; das liefert hochspezifische Immunwaffen.

BERLINER ILLUSTRIERTE ZEITUNG 1910 / PUBLIC DOMAIN

AUF EINEN BLICK

KREBS: NEUE THERAPIEN IM VISIER

1 Dank Verbesserungen der konventionellen Krebsbehandlung – mit **Operation, Chemotherapie und Bestrahlung** – sind die Überlebensaussichten von Krebspatienten in den letzten Jahrzehnten deutlich gestiegen. Dennoch haben viele der erfolgreich Behandelten noch immer keine normale **Lebenserwartung**.

2 Deswegen möchten Mediziner nun **das Immunsystem** gezielt mit in die Therapie einbeziehen. Neben Immunstimulanzien untersuchen sie zu dem Zweck auch **therapeutische Impfstoffe**.

3 Nach manchen Fehlschlägen in den letzten zehn Jahren scheint sich nun die Wende anzubahnen. Der erste Impfstoff zur Behandlung von Prostatakrebs wurde in Amerika zugelassen, und eine **neue Generation von therapeutischen Krebsvakzinen** wird erprobt.

1980
Mit Bakterien, in die das Gen für Interferon eingeschleust wurde, lässt sich das immunstimulierende Protein unbegrenzt produzieren.

PHOTO RESEARCHERS / GARY RETHERFORD

1986
USA: Zulassung von Interferon für Haarzellleukämie als erstem nachweislich wirksamem Krebsimmuntherapeutikum

1997
USA: Zulassung des ersten monoklonalen Antikörpers gegen Krebs – Rituximab (Rituxan) beim Non-Hodgkin-Lymphom

1998
USA: Zulassung des monoklonalen Antikörpers Trastuzumab für metastasierenden Brustkrebs

AG. FOCUS / EYE OF SCIENCE

2002
Nachweis, dass eine Krebstherapie mittels T-Zellen möglich ist und sowohl CD8- als auch CD4-Zellen erfordert (Foto: T-Zellen attackieren eine Krebszelle, rot)

2010
USA: Zulassung von Provenge für fortgeschrittenen Prostatakrebs als erstem Impfstoff gegen einen bestehenden Krebs

Im Jahr 2002 rückte eine Lösung näher. Damals erkannte ein Forscherteam um Steven Rosenberg am amerikanischen National Cancer Institute in Bethesda (Maryland): Höchst bedeutsam für die Krebsabwehr sind neben den CD8- auch die CD4-Lymphozyten. Sie fungieren gleichsam als Generäle des Immunsystems und erteilen der Fußtruppe, die das Töten übernimmt, genaue Angriffsbefehle – in diesem Fall den CD8-Zellen (siehe Kasten S. 29).

Das Team um Rosenberg gewann T-Lymphozyten von 13 Patienten, die an einem Melanom (schwarzen Hautkrebs) litten und schon Metastasen hatten. Diese Immunzellen wurden in Kulturgefäßen so aktiviert, dass sie zugegebene Mela-

www.spektrum.de/aboplus

Der Premiumbereich – exklusiv für Abonnenten von **Spektrum der Wissenschaft**

SDW ABOPLUS

Abonnenten von **Spektrum der Wissenschaft** profitieren nicht nur von besonders günstigen Abokonditionen, exklusiv auf sie warten unter www.spektrum.de/aboplus auch eine ganze Reihe weiterer hochwertiger Inhalte und Angebote, unter anderem:

- Alle **Spektrum der Wissenschaft**-Artikel seit 1993 im Volltext
- Ein Mitgliedsausweis, dessen Inhaber in zahlreichen Museen und wissenschaftlichen Einrichtungen Vergünstigungen erhält
- Vergünstigte Sonderhefte, kostenlose Downloads und das Produkt des Monats zum Spezialpreis
- Vergünstigte Sonderhefte sowie einen vergünstigten Bezug von Spektrum.de-Premium, mit unserer wöchentlichen Digitalzeitung »Die Woche«

Spektrum DER WISSENSCHAFT Wissenschaft aus erster Hand

www.spektrum.de/aboplus

nomzellen erkannten und abtöteten. Anschließend vermehrten die Forscher die aktivierten T-Zellen massiv und verabreichten sie wieder den Patienten. Solche Verfahren, eigene Immunzellen außerhalb des Körpers scharf zu machen, zu vermehren und dann dem Kranken zurückzugeben, bezeichnen Forscher als adoptive Immuntherapie (siehe hierzu auch den Artikel von Rosenberg in Spektrum der Wissenschaft 7/1990, S. 56). Bei einer Krebsimpfung hingegen würde das Immunsystem die besonderen Abwehrzellen selbst im Körper herstellen.

Vorangegangene Behandlungsversuche von Melanompatienten im Sinn einer adoptiven Immuntherapie allein mit CD8-Lymphozyten waren wirkungslos geblieben. Erst als das Rosenbergteam auch noch CD4-Zellen hinzufügte, gab es bessere, teils eindrucksvolle Resultate. Die Tumoren von 6 der 13 Patienten schrumpften erheblich. Zwei von ihnen bildeten über ein Dreivierteljahr nach Behandlungsende noch immer wirksame krebsspezifische Abwehrzellen. Auf die Prozedur selbst reagierten die Kranken meist vorübergehend mit grippeähnlichen Symptomen. Vier der so Behandelten zeigten allerdings zudem eine komplexe Autoimmunreaktion mit teilweisem Verlust der Hautpigmentierung.

Bei einer regelrechten **Krebsimpfung** würde das Immunsystem die Abwehrzellen selbst im Körper herstellen

Zu viel Aufwand mit Zellen aus dem Labor

Weil diese Versuche bewiesen, dass eine gezielte Krebsbehandlung mittels T-Zellen möglich sein sollte, fanden Ansätze zu Immuntherapien gegen die fatale Krankheit unter Medizinern endlich mehr Akzeptanz. Jedoch erforderte das beschriebene Vorgehen von Rosenbergs Gruppe eine Riesenanzahl an manipulierten Lymphozyten: pro Patient über 70 Milliarden CD8- und CD4-Zellen, was einigen hundert Millilitern Zellsuspension entspricht.

Deswegen suchten die Forscher nun nach einfacheren Verfahren, die trotzdem ebenso gute Ergebnisse erzielen. Sie wollten Immunzellen direkt im Körper dazu bringen, die gewünschten Eigenschaften zu entwickeln und sich stark zu vermehren – eben das, was nach einer erfolgreichen Impfung geschieht.

Wir Forscher bei der Firma Antigen Express freuten uns über Rosenbergs Befund, wonach ein Krebsimpfstoff zugleich CD4- und CD8-Lymphozyten aktivieren muss. Auf Grund eigener Tierversuche hatten wir dies schon vermutet und die Zukunftspläne unseres Unternehmens wesentlich danach ausgerichtet.

Für die Entwicklung eines Krebsimpfstoffs sind von vornherein drei Aspekte entscheidend. Zum einen kommt es darauf an, auf welches molekulare Element – Antigen genannt – des Tumors man das Immunsystem überhaupt ansetzen möchte. Auch muss man erarbeiten, wie man dem Immunsystem die Vakzine am besten darbietet, damit es gut darauf anspricht. Ebenso ist es wichtig zu wissen, für welche Krebspatienten der Impfstoff in Frage kommt, und auch, in welchem Krankheitsstadium man ihn effektiv einsetzt.

Mitarbeiter von Firmen, die sich mit solchen Entwicklungen befassen, haben in den letzten Jahren viele Proteine und auch Peptide, also kürzere Proteinfragmente, von Tumoren auf ihre Eignung als Impfstoffantigene hin untersucht. Von Vorteil ist in dem Zusammenhang, dass dieselben genetischen Veränderungen, die Krebszellen ungehemmt wachsen lassen, sie auch dazu bringen, bestimmte Proteine wesentlich mehr zu bilden als gesunde Zellen. Rund zehn Unternehmen, darunter unseres, arbeiten bereits an verschiedenen Peptiden.

Man könnte für den gleichen Zweck auch DNA-Stücke mit Krebsgenen verwenden oder selbst ganze Krebszellen, die durch Bestrahlung ungefährlich gemacht wurden. Aber Peptide bieten sich unter anderem deshalb an, weil sie recht klein, kostengünstig zu produzieren und insbesondere leicht manipulierbar sind. Mit ihnen kann man daher relativ einfach Impfstoffe entwerfen und in größerer Menge herstellen. Ein weiterer Vorteil: Ein und dieselbe Vakzine müsste sich für verschiedene Krebsarten eignen. Denn soweit bisher untersucht, scheinen die gleichen Peptide immer wieder vorzukommen. Eine zellbasierte Immuntherapie würde dagegen individuell angepasste Präparate erfordern. Nicht zuletzt verursachen sämtliche bisher getesteten Peptidimpfstoffe vergleichsweise geringe Nebenwirkungen, wie vorübergehende Reizungen an der Injektionsstelle oder mitunter Fieber und andere grippeähnliche Symptome.

Vor zehn Jahren hatten Wissenschaftler von Antigen Express ein Peptid umgebaut, das zuvor schon in einem experimentellen Impfstoff gegen Brustkrebs verwendet worden war. Es stammte aus dem HER2-Protein, dem Angriffsziel des eingangs erwähnten Trastuzumab – eines monoklonalen Antikörpers, mit dem bestimmte Formen von Brustkrebs behandelt werden. Als sie dieses Peptid um nur vier Aminosäuren verlängerten, steigerte das seine Stimulationskraft für CD4- und CD8-Lymphozyten enorm, die HER2 produzierende Brustkrebszellen angreifen. Dies war das oben erwähnte Ergebnis, auf das unsere Firma setzte. Uns bestärken jetzt auch kürzlich veröffentlichte vorläufige Befunde anderer Forscher, die unseren Impfstoff mit zwei anderen Peptidvakzinen verglichen, welche nur auf CD8-Zellen abzielen.

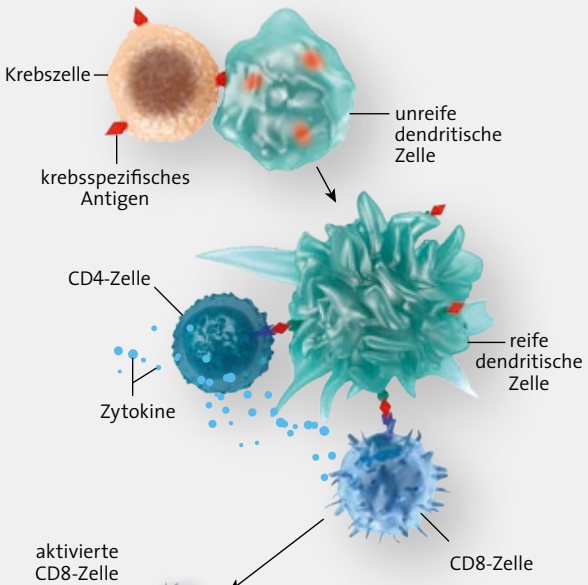
Die einzelnen Unternehmen verfolgen unterschiedliche Ansätze. Dendreon etwa, Hersteller des vorne genannten, in Amerika zugelassenen Impfstoffs Provenge gegen Prostatakrebs, sowie einige weitere Firmen manipulieren die dendritischen Immunzellen: die wichtigsten »Wachhunde« des Immunsystems (siehe Kasten rechts, rechts oben). Dendritische Zellen finden sich im gesamten Körper, doch vor allem dort, wo Kontakt mit der Außenwelt besteht, also besonders in der Haut und in der Schleimhaut des Verdauungstrakts. Diese

Drei Impfstrategien

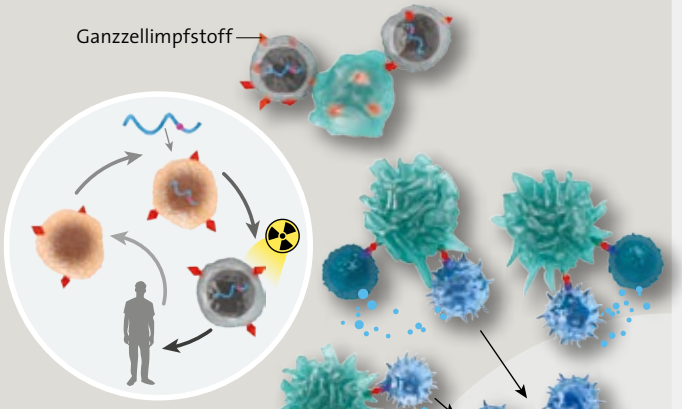
Das Immunsystem erkennt Krebszellen nicht ohne Weiteres als fremd oder gefährlich. T-Zellen – bestimmte Immunzellen – von Patienten lassen sich aber im Labor hierzu veranlassen, dann vermehren und zurückübertragen. Noch praktischer wäre ein therapeutischer Impfstoff, bei dem dies im Körper selbst geschieht. Medizinforscher entwickeln hierzu drei verschiedene Ansätze.

Die natürliche Immunreaktion auf Krebszellen

Dendritische Immunzellen verschlingen Tumorzellen und präsentieren Bestandteile (Antigene) davon CD4- und CD8-Zellen. CD4-Zellen setzen nun Zytokine frei, welche CD8-Zellen aktivieren helfen. Diese attackieren dann Zellen mit dem betreffenden Antigen, also Krebszellen. Nur ist diese Reaktion oft nicht stark genug, um einen ganzen Tumor zu vernichten.

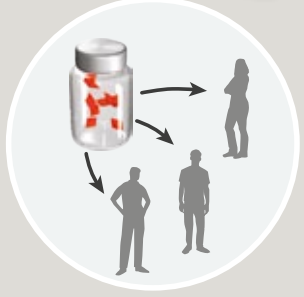


1

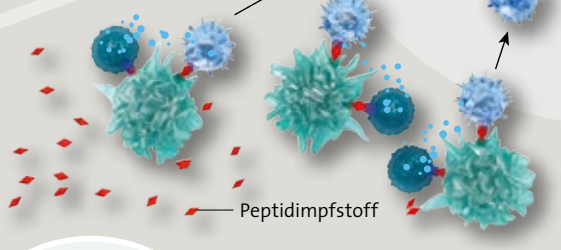


Komplette Tumorzellen

Dem Patienten werden Krebszellen entnommen. In diese schleust man Gene ein, die dem Immunsystem deren Erkennung erleichtern. Vor der Rückgabe werden die Zellen mittels Bestrahlung abgetötet. Sie bieten der Immunabwehr zahlreiche Zielstrukturen.

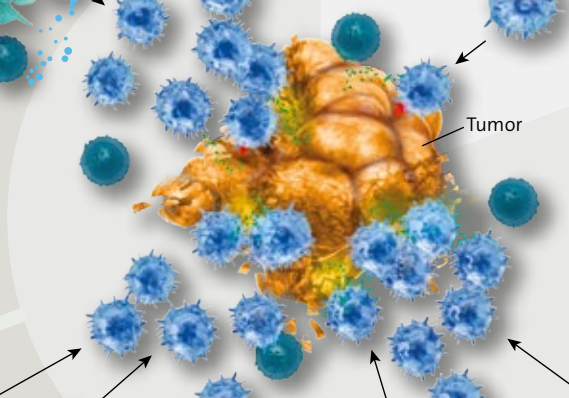


2



Peptide

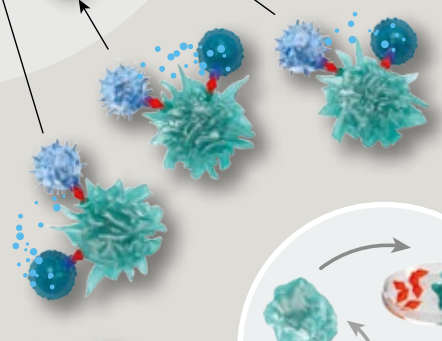
Das Immunsystem erkennt krebsspezifische Antigene, die etwas verändert wurden, teilweise viel besser. Solche Fragmente oder Peptide sind leicht im Labor herstellbar und für viele Patienten geeignet.

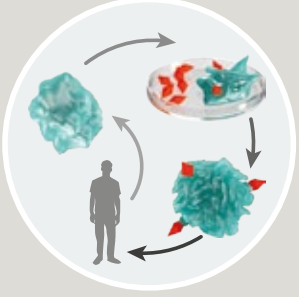


3

Dendritische Zellen

Dendritische Zellen des Patienten werden im Labor mit Tumorantigenen versetzt. Auf diese Weise wird auch der kürzlich in den USA zugelassene Impfstoff gegen Prostatakrebs hergestellt.





AXS BIOMEDICAL ANIMATION STUDIO

Wächterzellen gehören zu den ersten, die T-Lymphozyten alarmieren.

Der Trick bei dem Prostataimpfstoff ist, dendritische Zellen im Labor mit Antigenen von Krebszellen zu beladen und sie dem Kranken zuzuführen – was die T-Zellen in Gang bringen soll. Dazu muss man allerdings einigen Aufwand betreiben. Immunzellen nehmen nur von genetisch gleichen Partnern Befehle entgegen. Deswegen werden dem Patienten dendritische Zellen entnommen, mit dem krebsspezifischen Protein versehen und ihm wieder injiziert. Eine vollständige Behandlung kostet derzeit fast 100 000 Dollar. Zu den Nebenwirkungen gehören Schüttelfrost, Fieber und Kopfschmerzen, seltener auch ein Schlaganfall. Die US-Behörde ließ den Impfstoff zu, weil in einer Kurzzeitstudie damit behandelte Männer mit fortgeschrittenem Prostatakrebs im Durchschnitt mindestens vier Monate länger lebten als solche ohne diese Behandlung.

Zeitverzögerte Reaktion auf Immuntherapie

Für Krebsimpfstoffe scheint eine neue Zeit angebrochen – nicht nur wegen Provenge, denn auch eine Reihe anderer viel versprechender Impfpräparate ist derzeit in klinischen Tests. Je weiter wir auf dem Feld vordringen, desto deutlicher wird aber auch, dass an eine Immuntherapie andere zeitliche Maßstäbe anzulegen sind als an eine Chemotherapie oder Bestrahlung. Ob eine konventionelle Behandlung anschlägt oder nicht, pflegt sich in ein paar Wochen herauszustellen. Ist der Tumor dann nicht kleiner geworden, so hat die Maßnahme vermutlich nichts gebracht. Mit Krebsimpfungen ist das verschiedenen klinischen Studien zufolge anders. Offenbar kann es da bis zu einem Jahr dauern, bis das Immunsystem das Tumorwachstum in den Griff bekommt.

Das überrascht nicht wirklich. Die Abwehr benötigt eine Menge Überredung, damit sie gegen Krebszellen vorgeht, denn diese gleichen immunologisch normalen Körperzellen allzu sehr. Viren oder Bakterien zu attackieren, also wirkliche Fremdlinge, fällt ihr sehr viel leichter. Diese Toleranz für Körpereigenes dürfte das größte Hindernis sein, das die Forscher bei Krebsimpfstoffen überwinden müssen. Nicht selten scheinen Tumoren nach dem Impfen zunächst sogar noch weiterzuwachsen. Doch wie Gewebeproben zeigten, kann die Zunahme auf eingewanderte Immunzellen zurückgehen, welche die Gesamtmasse der Geschwulst vergrößern.

Sollte das Immunsystem auch weiterhin so schleppend auf die Impfreize ansprechen, wie es bisher der Fall zu sein scheint, würde daraus für Behandlungsstrategien in näherer Zukunft zweierlei folgen: Zum einen hätten Patienten mit frühen Krebsstadien vermutlich die besseren Chancen – solange nämlich die Tumoren nicht so groß sind, dass sie bereits das Immunsystem hemmen. Diesem Personenkreis bleibt auch genügend Zeit, eine Immunantwort abzuwarten. Zum anderen müssten sich Patienten mit fortgeschrittener Erkrankung vor der Impfung zuerst konventionellen Behandlungen unterziehen, die den Tumor zunächst verkleinern. Denn große, länger bestehende Geschwülste vermögen das Immunsystem nun einmal besser zu schwächen und sogar zu unterlaufen als kleine, jüngere. Weil sie viel mehr Zellen enthalten, geben sie nicht nur mehr immunsupprimierende Substanzen ab, sondern auch eine größere Palette davon. Im Spätstadium der Erkrankung kann selbst ein gesundes Immunsystem der Tumormasse wohl einfach nicht mehr Herr werden.

Auch wenn sicherlich noch einige Hürden bestehen, wissen wir nun: Das Immunsystem lässt sich bei einer Krebstherapie erfolgreich einbeziehen. Diese Erkenntnis gab vielen Krebsforschern aus wissenschaftlichen Institutionen und der Industrie, die auf dem Gebiet arbeiten und allzu oft Rückschläge einstecken mussten, neue Zuversicht. Sogar manche Ergebnisse früherer klinischer Studien, die bisher als gescheitert galten, werden jetzt neu auf übersehene Anzeichen von Immunreaktionen hin analysiert. Ein solcher Verdacht besteht etwa im Fall der potenziellen Prostatakrebsvakzine Prostvac. Dieser Impfstoff verfehlte damals das gesetzte Ziel, das Tumorwachstum aufzuhalten, und die kleine Firma, die ihn entwickelte, gab auf. Später stellte sich jedoch heraus, dass die Behandlung den Kranken mehr Lebenszeit schenkte. Glücklicherweise hatte sich ein anderes Unternehmen die Rechte an Prostvac gesichert und befasst sich nun damit.

Wer in einem Pharmabetrieb auf diesem Feld forscht, lernt bald, keine zu schnellen Versprechen abzugeben. Dennoch – immer mehr von uns sehen die therapeutische Krebsimpfung als zukünftiges Standbein neben den drei klassischen Verfahren Operation, Chemotherapie und Bestrahlung. Für einige der häufigsten Krebsarten könnte sie in absehbarer Zeit Wirklichkeit werden.

DER AUTOR

Eric von Hofe ist Präsident der Firma Antigen Express mit Sitz in Worcester, Massachusetts. Seine wissenschaftliche Arbeit widmete er der biotechnologischen Entwicklung neuer Krebstherapeutika.

QUELLEN

Perez, S. et al.: A New Era in Anticancer Peptide Vaccines. In: Cancer 116, S. 2071–2080, 2010; www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20187092
Vergati, M. et al.: Strategies for Cancer Vaccine Development. In: Journal of Biomedicine and Biotechnology 2010; www.hindawi.com/journals/jbb/2010/596432

LITERATURTIPP

Neue Strategien gegen Krebs. Spektrum der Wissenschaft, Dossier 3/2009
Ausgewählte Artikel von »Spektrum der Wissenschaft« zum Thema Krebs

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1139700

Kampf dem Schmerz.

Medizinthemen spielen in FOCUS schon immer eine zentrale Rolle. In FOCUS-GESUNDHEIT bündeln wir die Erfahrung unserer Fachredaktion mit der Kompetenz von Experten. Die aktuelle Ausgabe bringt Sie auf den neuesten Stand zum Thema Rücken: Sie präsentiert innovative Behandlungsmethoden, beleuchtet vorbeugende Maßnahmen und nennt anerkannte Spezialisten.

Außerdem in diesem Heft:

- **Selbst-Test:** Wie beweglich sind Sie? Wie kräftig? Wie gefährdet?
- **Bandscheibe:** Was bringt die Operation?
- **Rückenschmerz:** Woher er kommt, was wirklich hilft. Die besten Ratschläge der Experten.
- **Prävention:** Den Rücken stark machen – jeden Tag.

Jetzt am Kiosk.

FOCUS-GESUNDHEIT gibt es auch unter: Tel. 0180 5 480 1000*, Fax 0180 5 480 1001*, www.focusgesundheit.de

*€ 0,14/Min. aus dem dt. Festnetz. Aus dem Mobilnetz max. € 0,42/Min.

ERNÄHRUNG

Steak aus der Retorte?

Wie lässt sich der wachsende Fleischhunger der Weltbevölkerung befriedigen, ohne den Planeten zu Grunde zu richten? Für einige Forscher lautet die Antwort: Muskelgewebe züchten – in der Petrischale!

Von Jeffrey Bartholet

Visionäre vertreten ihre Sache leidenschaftlich – ja sogar fanatisch. Willem van Eelen ist da keine Ausnahme. Mit 87 Jahren kann er auf ein langes, außergewöhnliches Leben zurückblicken. Geboren wurde er im damals niederländisch beherrschten Indonesien, als Sohn eines Arztes, der eine Lepra-Kolonie verwaltete. Noch als Jugendlicher kämpfte er im Zweiten Weltkrieg gegen Japan und verbrachte mehrere Jahre in Kriegsgefangenenlagern. Die japanischen Wächter beuteten die Gefangenen als Sklavenarbeiter aus und ließen sie hungern. »War ein streunender Hund dumm genug, über den Zaun zu springen, hechteten die Gefangenen auf ihn zu, zerrissen ihn und aßen ihn roh«, erinnert sich van Eelen. »Wenn man meinen Bauch anschaute, sah man die Wirbelsäule. Ich war eigentlich schon tot.« Diese Erfahrung führte zu einer lebenslangen Obsession mit den Themen Ernährung und Kunst des Überlebens.

Wachsen lassen wie Getreide

Einige Jahre nach der Befreiung Indonesiens studierte van Eelen Medizin an der Amsterdamer Universität. Dort zeigte ein Professor den Studenten, wie er ein Stück Muskelgewebe im Labor am Leben hielt. Die Demonstration brachte van Eelen auf die Idee, essbares Fleisch zu züchten, ohne dafür Tiere aufziehen und schlachten zu müssen. Er entwickelte die Vision von proteinreicher Nahrung, die man wie Getreide wachsen lassen könnte – unabhängig von Klima- und anderen Umweltbedingungen und ohne Lebewesen töten zu müssen.

Heute scheint die Idee aktueller denn je. 1940 gab es etwas mehr als zwei Milliarden Menschen auf der Welt, und globale Erwärmung war kein Thema. Heute beherbergt unser Planet dreimal so viele Personen. Laut einem Bericht der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen von 2006 ist der Viehzuchtsektor für etwa 18 Prozent der menschengemachten Treibhausgasemissionen verantwortlich – ein größerer Anteil als jener sämtlicher Transportmittel zusammengenommen! Darüber hinaus erwartet die Organisation fast eine Verdoppelung des weltweiten Fleischverzehrs zwischen 2002 und 2050.

Fleisch aus Bioreaktoren statt Bauernhöfen könnte die schädlichen Auswirkungen auf unseren Planeten mildern. Hanna Tuomisto, eine Doktorandin an der University of Oxford, veröffentlichte 2010 eine Untersuchung der möglichen Vorteile, wenn Muskelzellen in einem Kultursubstrat aus

AUF EINEN BLICK

FLEISCHLABORE DER ZUKUNFT

1 Fleisch aus Laborkulturen könnte proteinreiche Nahrung liefern – ohne die **Umweltbelastungen** und **ethischen Bedenken**, die mit der **Massentierhaltung** einhergehen. Doch die Forschung kommt bislang nur schleppend voran.

2 Ein viel versprechender Ansatz ist die Kultur von **embryonalen Stammzellen in Nährmedien** und ihre **anschließende Ausdifferenzierung zu Muskelzellen**. Allerdings sind hier noch viele wissenschaftliche und technologische Hürden zu überwinden.

3 Kritiker bezweifeln, dass die **Konsumenten** das Laborfleisch überhaupt akzeptieren würden. Derzeit geht eine Studie dieser Frage nach – erste Ergebnisse sprechen dafür, dass die Menschen sich durchaus mit den künstlichen Hamburgern anfreunden könnten.

Ein vollständiges Stück Fleisch direkt aus der Petrischale wird noch lange ein Wunschtraum bleiben. Als Erstes dürfte In-vitro-Muskelgewebe in Form von Würsten und Hamburgern auf den Markt kommen – sofern sich die technischen Hürden überwinden lassen.

KEVIN VAN AELST

Zyanobakterien-Hydrolysat gezüchtet würden. Demnach könnte dies im Vergleich zur konventionellen Fleischproduktion den Energieverbrauch in Europa um 35 bis 60 Prozent senken, den Ausstoß von Treibhausgasen um 80 bis 95 Prozent und die Flächennutzung um 98 Prozent.

Im Moment dienen 30 Prozent der eisfreien Fläche der Erde als Weideland oder zum Anbau von Viehfutter. Wenn sich künstlich gezüchtetes Fleisch durchsetzen würde, ließe sich ein Großteil dieser Landfläche für andere Zwecke nutzen: etwa für neue Wälder, die der Luft Kohlendioxid entziehen. Fleisch müsste nicht mehr rund um den halben Globus transportiert werden, weil die Produktionsstätten nahe am Verbraucher gebaut würden. Einige Befürworter der Idee stellen sich beispielsweise kleine städtische Fleischlabors vor, die ihre Produkte auf Straßenmärkten anbieten.

Schon Winston Churchill hielt In-vitro-Fleisch für eine gute Idee. »In 50 Jahren werden wir der Unsinnigkeit entkommen, ein ganzes Hühnchen zu züchten, nur um eine Brust oder einen Flügel zu essen, indem wir diese Teile separat in einem geeigneten Medium heranzüchten«, sagte der spätere britische Premierminister 1932 in seinem Buch »Thoughts and Adventures« voraus. Für den größten Teil des 20. Jahrhunderts nahmen nur wenige diese Idee ernst – van Eelen aber ließ sie niemals los. Zwar hatte er im Lauf der Jahre viele unterschiedliche Jobs: Er verkaufte Zeitungen, arbeitete als Taxifahrer, fertigte Puppenhäuser an, gründete eine Organisation zur Unterstützung benachteiligter Kinder und besaß Kunstgalerien und Cafés. Daneben verfasste er jedoch immer wieder Vorschläge zum Thema In-vitro-Fleischproduktion und investierte sogar viel Geld in die Anmeldung von Paten-

ten. Zusammen mit zwei Partnern erhielt er 1999 ein niederländisches Patent, dann weitere europäische Patente und schließlich zwei US-amerikanische. 2005 konnte er gemeinsam mit anderen den niederländischen Wirtschaftsminister davon überzeugen, die dortige Forschung zur In-vitro-Fleischproduktion mit zwei Millionen Euro zu unterstützen – die größte Summe, die eine Regierung bis heute diesem Gebiet zur Verfügung stellte.

Damals war es einem amerikanischen Wissenschaftler bereits gelungen, ein Stück Fischfilet im Labor heranzuziehen. Unterstützt von einem kleinen Stipendium der US-Raumfahrtbehörde NASA, die sich für die Entwicklung von Nahrungsquellen für lange Weltraumreisen interessierte, hatte Morris Benjaminson einem Goldfisch kleine Stückchen Skelettmuskulatur entnommen und diese in Kulturgefäßen wachsen lassen. Danach wurden die Explantate kurz in Olivenöl, gehacktem Knoblauch, Zitrone und Pfeffer mariniert, in Semmelbröseln paniert und frittiert. »Einige Kolleginnen beurteilten danach das Ergebnis«, sagt Benjaminson, heute emeritierter Professor am Touro College in Bay Shore, US-Bundesstaat New York. »Es sah aus und roch eigentlich genauso wie ein Fisch, den man im Supermarkt kaufen kann.« Doch die NASA war wohl überzeugt davon, dass es einfachere Wege geben müsse, um Astronauten während langer Weltraumreisen mit Proteinen zu versorgen, und verweigerte weitere Forschungsgelder.

Außer Spesen nichts gewesen?

Mit dem Geldsegen der niederländischen Regierung wollten van Eelen und sein Kollege Henk P. Haagsman von der Universität Utrecht beweisen, dass man Stammzellen – die sich in eine Vielzahl verschiedener Zelltypen differenzieren können – aus Nutztieren entnehmen, kultivieren und schließlich dazu anregen kann, sich zu Skelettmuskelzellen zu entwickeln. Sie finanzierten ein Team aus einem Vertreter der Fleischfirma Meester Stegeman BV sowie führenden Wissenschaftlern von drei niederländischen Universitäten: Experten aus Amsterdam konzentrierten sich auf die Herstellung effizienter Wachstumsmedien; eine Arbeitsgruppe in Utrecht arbeitete daran, Stammzellen zu isolieren, zu vermehren und zu Muskelzellen zu differenzieren; und Forscher an der technischen Universität Eindhoven versuchten, die Muskelzellen zu »trainieren«, damit sie größer würden.

Die Wissenschaftler machten durchaus Fortschritte. So konnten sie feine, dünne Streifen von Muskelgewebe im Labor heranziehen – das aussah wie Stückchen von Muschelfleisch und eine zähe Konsistenz ähnlich der von Tintenfisch aufwies –, doch verhinderten immer noch zahlreiche Hürden eine vermarktungsfähige Großproduktion. »Wir lernten ständig dazu, aber wir hatten immer noch nichts aus einer Petrischale, das wie ein Steak schmeckte«, so Peter Verstrate, der damalige Sprecher von Meester Stegeman. Schließlich ging das niederländische Geld aus.

Heute schimpft van Eelen, dass einer der beteiligten Wissenschaftler »dumm« gewesen sei und dass andere ihn und

die niederländische Regierung lediglich ausgenommen hätten. »Ich weiß nicht, was sie in den vier Jahren getan haben. Reden, reden, reden – und jedes Jahr mehr von dem Geld nehmen«, sagt er. Laut den Wissenschaftlern hat van Eelen allerdings die Größe der Herausforderungen unterschätzt. »Er hatte die naive Idee, dass man Muskelzellen in eine Petrischale legen könnte, und sie würden einfach so wachsen. Und wenn man genug Geld in ein Projekt steckt, hätte man in ein paar Jahren Fleisch«, so Bernard Roelen, ein Zellbiologe, der an dem Projekt in Utrecht mitarbeitete.

Van Eelen war mit seinen revolutionären Visionen nicht allein. Im Jahr 2005 schloss ein Artikel in der »New York Times« mit der Vorhersage: »In einigen Jahren könnte es Fleisch aus Labors geben, das sich als Würstchen oder Pastete vermarkten lässt.« Einige Monate zuvor hatten Wissenschaftler den ersten begutachteten Fachartikel über die Realisierbarkeit der industriellen Fleischproduktion in Laborkulturen in der Zeitschrift »Tissue Engineering« veröffentlicht. Zu den Autoren zählte auch Jason Matheny, Gründer von New Harvest, einer Unterstützerorganisation für synthetisches Fleisch. Er versteht die Herausforderungen besser als die meisten anderen. »Noch ist die Gewebezucht sehr schwer und extrem teuer«, sagt er. »Um vom Markt akzeptiert zu werden, müssen wir vor allem die technischen Probleme lösen, die die Kosten in die Höhe treiben.« Dazu bräuchte es aber Geld, und nur wenige Regierungen oder Organisationen waren bisher gewillt, die nötigen Mittel bereitzustellen.

Den beteiligten Wissenschaftlern erscheint diese Weigerung kurzsichtig. »Ich glaube, es wird schließlich unsere einzige Wahl sein«, ist Mark Post, Leiter der Abteilung für Physiologie an der Universität Maastricht, überzeugt. »Ich sehe nicht, wie wir in den kommenden Jahrzehnten weiterhin auf die hergebrachte Viehhaltung bauen können.«

In Theorie würde die In-vitro-Fleischproduktion etwa so ablaufen: Zuerst entnehmen Labortechniker einem Schwein, Huhn oder anderen Tier Stammzellen und lassen diese in Bioreaktoren mit Hilfe einer Nährsubstanz wachsen. Die Zellen teilen sich fortlaufend über viele Monate. Danach lassen die Techniker sie sich spezifisch zu Muskelgewebe ausdifferenzieren, im Unterschied etwa zu Knochen- oder Gehirngewebe. Schließlich werden die Muskelzellen »aufgebaut« – so

wie auch Tier und Mensch ihre Körperkraft mittels Bewegung und Belastung steigern. Zurzeit stellen sich bei jeder Stufe dieses Ablaufs Probleme. Eines besteht darin, Stammzelllinien zu entwickeln, die sich lange Zeit nur vermehren, ohne sich spontan zu differenzieren. Eine weitere Herausforderung ist es, zu erreichen, dass die Mehrzahl der Stammzellen schließlich tatsächlich zu Muskelzellen wird. »Von zehn Zellen sollten sich mindestens sieben oder acht zu Muskelzellen entwickeln«, sagt Roelen. »Im Moment schaffen wir das lediglich bei der Hälfte.«

50 000 Tonnen Fleisch aus zehn Zellen

Die Forscher aus Utrecht versuchten, embryonale Stammzelllinien aus Schweinen zu gewinnen und zu vermehren. Unter normalen Bedingungen könnten sich solche Zellen über einen langen Zeitraum jeden Tag verdoppeln, womit zehn Zellen in nur zwei Monaten prinzipiell zu der beeindruckenden Menge von rund 50 000 Tonnen Fleisch heranwachsen könnten. »Die Kultivierung embryonaler Stammzellen wäre für diesen Zweck ideal, da diese Zellen eine nahezu unerschöpfliche Fähigkeit zur Selbsterneuerung haben«, so ein 2009 erschienener Bericht des Utrecht-Teams. »Theoretisch würde eine solche Zelllinie ausreichen, um buchstäblich die ganze Welt zu ernähren.«

Bis jetzt gibt es jedoch solche Zelllinien nur von Mäusen, Ratten, Rhesusaffen und Menschen. Embryonale Stammzellen von Nutztieren neigen dazu, sich sehr schnell von selbst zu spezialisierten Zellen zu differenzieren. Laut Bericht der Utrechter schlagen Schweinezellen dabei meistens eine »neurale« Richtung ein. Ergebnis: Gehirn statt Schinken.

Die Utrechter Gruppe arbeitete auch mit adulten Stammzellen, die bereits weit gehend auf einen Gewebetyp vorprogrammiert sind. Sie finden sich unter anderem in der Skelettmuskulatur und reparieren dort das Gewebe bei Verletzungen oder anderen Schädigungen. Will man also für die Herstellung von In-vitro-Fleisch möglichst sichergehen, tatsächlich Muskelgewebe zu erhalten, wären adulte Stammzellen aus Skelettmuskulatur die erste Wahl. Doch bis jetzt konnten Wissenschaftler diese noch nicht dazu bringen, sich so bereitwillig wie embryonale Zellen zu vermehren.

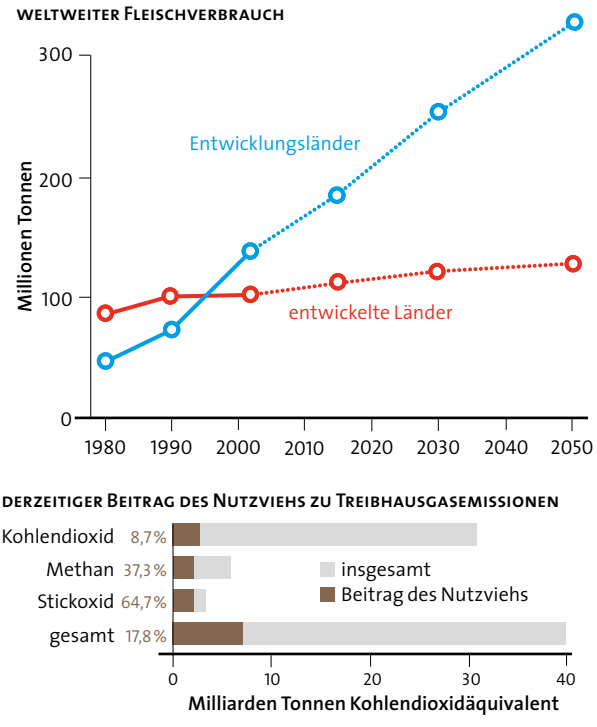
Die Kosten stellen eine weitere Hürde dar. So ist die Nährsubstanz, die zur Zucht von Stammzellen jeglicher Art benötigt wird, sehr teuer. Mit den derzeit erhältlichen Kulturmedien würde die Produktion eines knappen halben Kilos Fleisch etwa 50 000 US-Dollar kosten, so Roelen, und die beste Nährsubstanz wird dazu noch aus Kälberföten oder dem Serum von geschlachteten Pferden gewonnen. In den letzten Jahren haben Wissenschaftler zwar Rezepte für Medien entwickelt, die keine tierischen Produkte enthalten. Mittels Gentechnologie brachten sie etwa Pflanzenzellen dazu, tierische Proteine zu produzieren, die sich für die Fleischzucht im Labor eignen. Doch teuer sind diese Nährmedien ebenfalls noch. Ein auf Algen basierendes Medium könnte möglicherweise am besten funktionieren, da solche Gewächse all jene Proteine und Aminosäuren erzeugen können, die Zellen zum Überleben benötigen – aber auch das ist zumindest heute noch alles andere als preisgünstig.

Angenommen, die Forscher schaffen es, Muskelzellen im großen Stil zu produzieren, so müssen sie diese am Leben erhalten und aufbauen. Zurzeit können sie einen hauchdünnen Gewebestreifen herstellen – doch sobald der dicker als ein paar Zelllagen wird, beginnen Teile davon abzusterben. Denn alle Zellen brauchen zum Leben eine stete Zufuhr frischer Nährstoffe. Im Körper liefert der Blutstrom diese Substanzen und transportiert gleichzeitig den Abfall ab.

Daher arbeitet der Maastrichter Mark Post derzeit an einem dreidimensionalen System zur Verteilung solcher Nährstoffe. Er erforscht auch, wie sich die Muskelzellen vergrößern ließen. »Wenn man nach einem Knochenbruch seinen Gips abnimmt, erschrickt man: Die Muskeln sind praktisch verschwunden«, sagt er. »Doch innerhalb einiger Wochen kommen sie wieder zurück. Wir müssen lernen, diesen Prozess nachzustellen.« Der Körper erreicht das auf mehreren

Weltweit zunehmender Fleischverzehr

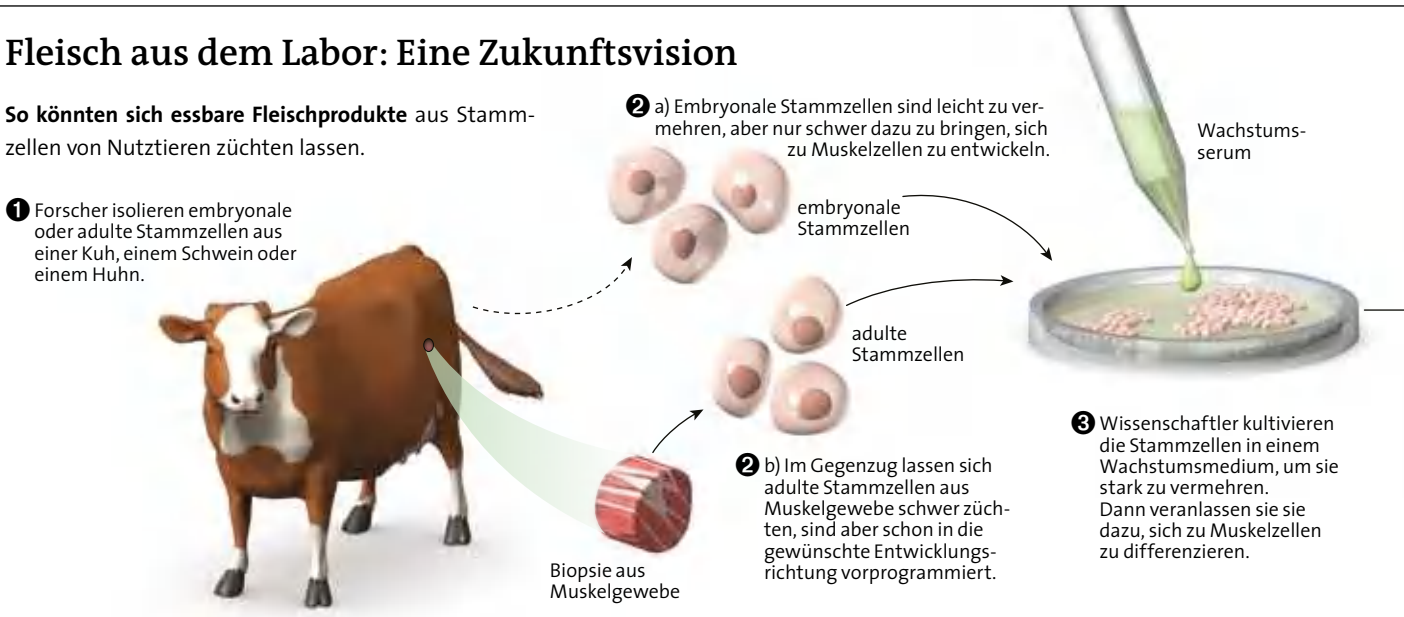
Die Einwohner reicher Länder essen bereits viel Fleisch, doch die Entwicklungsländer holen auf. Denn immer mehr Menschen ziehen in Städte, und verbesserte Infrastruktur gewährleistet, dass das Fleisch auf dem Weg vom Schlachthaus bis zur Küche gekühlt bleiben kann. Mit der Nachfrage nach Fleisch werden aber auch die Konsequenzen für die Umwelt wachsen. Schon heute ist die Tierhaltung für ein knappes Fünftel aller Treibhausgasemissionen verantwortlich.



JEN CHRISTIANSEN: FLEISCHVERBRAUCH NACH: THORNTON, P.K.: LIVESTOCK PRODUCTION – RECENT TRENDS, FUTURE PROSPECTS. IN: PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY B 365, S. 2853–2867, 2010; EMISSIONEN NACH: LIVESTOCK'S LONG SHADOW, REPORT OF THE FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, ROME 2006

Fleisch aus dem Labor: Eine Zukunftsvision

So könnten sich essbare Fleischprodukte aus Stammzellen von Nutztieren züchten lassen.



Wegen, darunter durch schlichtes Training. Im Labor können die Wissenschaftler Gewebe mit elektrischen Pulsen stimulieren. Aber das kostet viel und bringt wenig, da die Zellen lediglich um etwa zehn Prozent wachsen. Eine andere Methode bietet Verankerungsstellen an: Wenn sich die Zellen an verschiedenen Punkten fixieren können, entwickeln sie von allein eine gewisse Spannung. Post testete das Prinzip mit einem Gerüst aus Zuckerpolymeren, das im Lauf der Zeit zerfällt. Doch derzeit, sagt er, ergibt das auch noch keine Schwarzenegger-Muskeln.

Ihm schwebt aber eine weitere Methode vor, die womöglich am besten funktionieren könnte. Der Körper stimuliert das Muskelwachstum natürlicherweise mit winzigen Mengen von Chemikalien wie etwa Azetylcholin. Diese Stoffe sind billig, was unter anderem den Charme dieses Ansatzes ausmacht. »Der Trick besteht darin, die Substanzen nur in Form sehr, sehr kurzer Pulse zu geben«, sagt Post. Dies stellt die Forscher vor allem vor technologische Herausforderungen, nicht vor wissenschaftliche.

Für Fortschritte auf all diesen Gebieten braucht man natürlich Geld. 2008 bot die Tierrechtsorganisation PETA (People for the Ethical Treatment of Animals) eine Million US-Dollar dem Ersten, der bis zum Jahr 2012 kommerziell vermarktungsfähiges Hühnchenfleisch im Labor herstellen kann. Doch war das in erster Linie ein Werbetrick und nutzte keinem Wissenschaftler, der gerade Geld für seine laufenden Forschungen brauchte. Ernster zu nehmen sind die rund 800 000 Euro, die die niederländische Regierung 2011 für ein neues Vier-Jahres-Projekt bewilligte. Damit wird die Erforschung der Stammzellen in Utrecht fortgesetzt – und eine neue Studie über die sozialen und moralischen Fragen zum Thema synthetisches Fleisch gestartet.

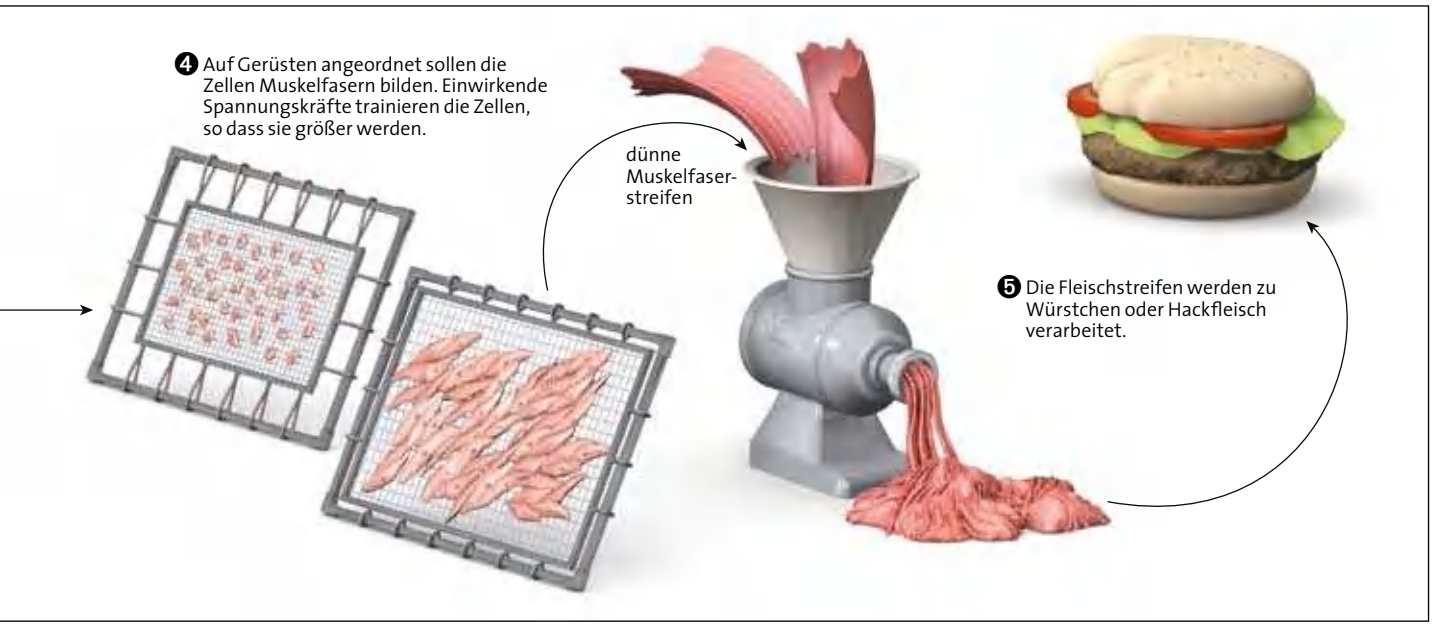
Denn manche glauben, dass die größte Hürde für die In-vitro-Produktion von Fleisch im kommerziellen Maßstab eine ganz andere ist: die soziale Akzeptanz. »Ich habe mit Wissenschaftlern über gezüchtetes Fleisch gesprochen, und sie meinen alle: ›Gute Idee‹«, sagt Tuomisto aus Oxford. »Wenn ich aber mit Laien darüber rede, reagieren sie skeptisch. Es klingt abschreckend. Dabei ist es doch im Grunde genommen das gleiche Zeug: Muskelzellen. Es wird nur auf unterschiedliche Art hergestellt.«

Die »Bäh-Antwort«

Cor van der Weele von der niederländischen Universität Wageningen untersucht die philosophischen Aspekte zum Beispiel anhand der Frage: Ist Fleisch aus der Retorte moralisch abstoßend oder im Gegenteil geradezu ein moralischer Imperativ – oder beides? Sie war verblüfft von den emotionalen Reaktionen mancher Leute. »Wir nennen es die ›Bäh-Antwort‹«, sagt sie. »Die Leute glauben zuerst, dass das etwas Kontaminiertes oder Ekelhaftes sein könnte.«

Doch dann beobachtete van der Weele, dass viele Menschen synthetisches Fleisch mit zwei anderen Ideen assoziieren: mit genetisch modifiziertem Essen – was vor allem in Europa einen schlechten Ruf hat – und einer negativen Wahrnehmung der modernen Fleischproduktion im Allgemeinen, vor allem wegen der Massentierhaltung und der damit verbundenen Krankheiten und Tiermisshandlungen. Wird ihnen erst einmal klar, dass Fleisch aus Laborkultur nicht genmanipuliert ist und eine saubere, tierfreundliche Alternative darstellt, so sagt sie, »kann sich die erste, negative Reaktion schnell ändern«.

Natürlich erfassen solche Beobachtungen nur Einzelfälle. Die niederländische Studie wird detailliert die gängigsten Antworten zum In-vitro-Fleisch zusammentragen und dabei die Reaktionen in unterschiedlichen Gegenden und Kulturen vergleichen. Zudem soll sie herausfinden, wie sich die Akzeptanz der Verbraucher verbessern ließe. Die Befürworter der Methode träumen von dem Tag, an dem Regierungen eine besondere Umweltsteuer für Fleischprodukte aus Viehhaltung



EMILY COOPER

erheben oder Verbraucher sich für In-vitro-Fleisch mit dem Etikett »ohne Grausamkeit hergestellt« entscheiden können.

»Ich glaube nicht, dass die Menschen wirklich etwas über die hygienischen Bedingungen in den meisten US-amerikanischen Schlachthäusern erfahren möchten oder über die dortigen Tötungsmethoden«, sagt Post, der sieben Jahre an der Harvard University und am Dartmouth College forschte, bevor er 2002 in die Niederlande zurückkehrte. Ein erneuter Ausbruch einer Seuche wie Rinderwahnsinn oder Vogelgrippe könnte das Laborfleisch wesentlich appetitlicher erscheinen lassen. »Wir sind einfach zu weit weg von dem, was wir essen«, sagt Roelen. »Wenn wir einen Hamburger bestellen, denken wir nicht ›Ich esse jetzt eine tote Kuh‹. Da fällt es aber auch nicht schwer, sich vorzustellen, dass die Leute künstlich gezüchtetes Fleisch akzeptieren könnten.«

Post hat einen gewagten Plan ausgeheckt, um an neue Forschungsgelder zu kommen: Er will eine In-vitro-Wurst herstellen – einfach nur um zu demonstrieren, dass es möglich ist. Die Wurst dürfte etwa 300 000 Euro kosten und ein halbes Jahr Arbeit für zwei Doktoranden und drei Inkubatoren bedeuten. »Wir werden zwei oder drei Biopsien von einem Schwein nehmen – sagen wir etwa 10 000 Stammzellen«, sagt Post. »Nach 20 Populationsverdopplungen haben wir dann zehn Milliarden Zellen.« In 3000 Petrischalen sollen die Doktoranden viele kleine Stücke von Schweinemuskelgewebe herstellen. Diese werden zusammen mit Gewürzen und einigen anderen nichtfleischlichen Zutaten, die Konsistenz und Geschmack verleihen, in eine Hülle gestopft. Am Ende soll die Wurst dann zusammen mit dem lebendigen, unversehrten Schwein vorgeführt werden, aus dem sie gemacht wurde.

»Im Grunde genommen ist es nur ein Trick, um mehr Forschungsgelder zu bekommen«, sagt Post. »Wir versuchen der Welt zu beweisen, dass wir ein echtes Produkt herstellen können.« Doch wird es auch wie eine Wurst schmecken? »Ich glaube schon«, meint Roelen. »Der Geschmack einer Wurst wird ja großteils künstlich erzeugt, indem man Salz und alle möglichen anderen Sachen hinzufügt.«

Van Eelen hält dagegen nicht viel von der Idee. Als unverbesserlicher Idealist glaubt er, dass die In-vitro-Revolution mit Fleisch beginnen sollte, das genauso aussieht, riecht und schmeckt wie das vom Bauernhof. Vermutlich wird van Eelen auch klar, dass die Zeit, seinen lebenslangen Traum noch zu verwirklichen, allmählich knapp wird. »Jedes Mal, wenn man mit ihm spricht, erzählt er von einem anderen Spitzenforscher, den er gefunden hat und der das Problem lösen wird«, sagt Roelen. »Ich verstehe ja seinen Standpunkt – aber die Gesetze der Natur kann ich auch nicht ändern.« ~

DER AUTOR

Jeffrey Bartholet ist Journalist. Er leitete früher das Washingtoner Büro des Magazins »Newsweek«.

QUELLEN

Bhat, B. F., Bhat, Z.: Animal-Free Meat Biofabrication. In: American Journal of Food Technology 6, S. 441–459, 2011
Haagsman, H. P. et al.: Production of Animal Proteins by Cell Systems. University of Utrecht, 2009
Jones, N.: A Taste of Things to Come? In: Nature 468, S. 752–753, 2010
Thornton, P. K.: Livestock Production – Recent Trends, Future Prospects. In: Philosophical Transactions of the Royal Society B 365, S. 2853–2867, 2010

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1139699**

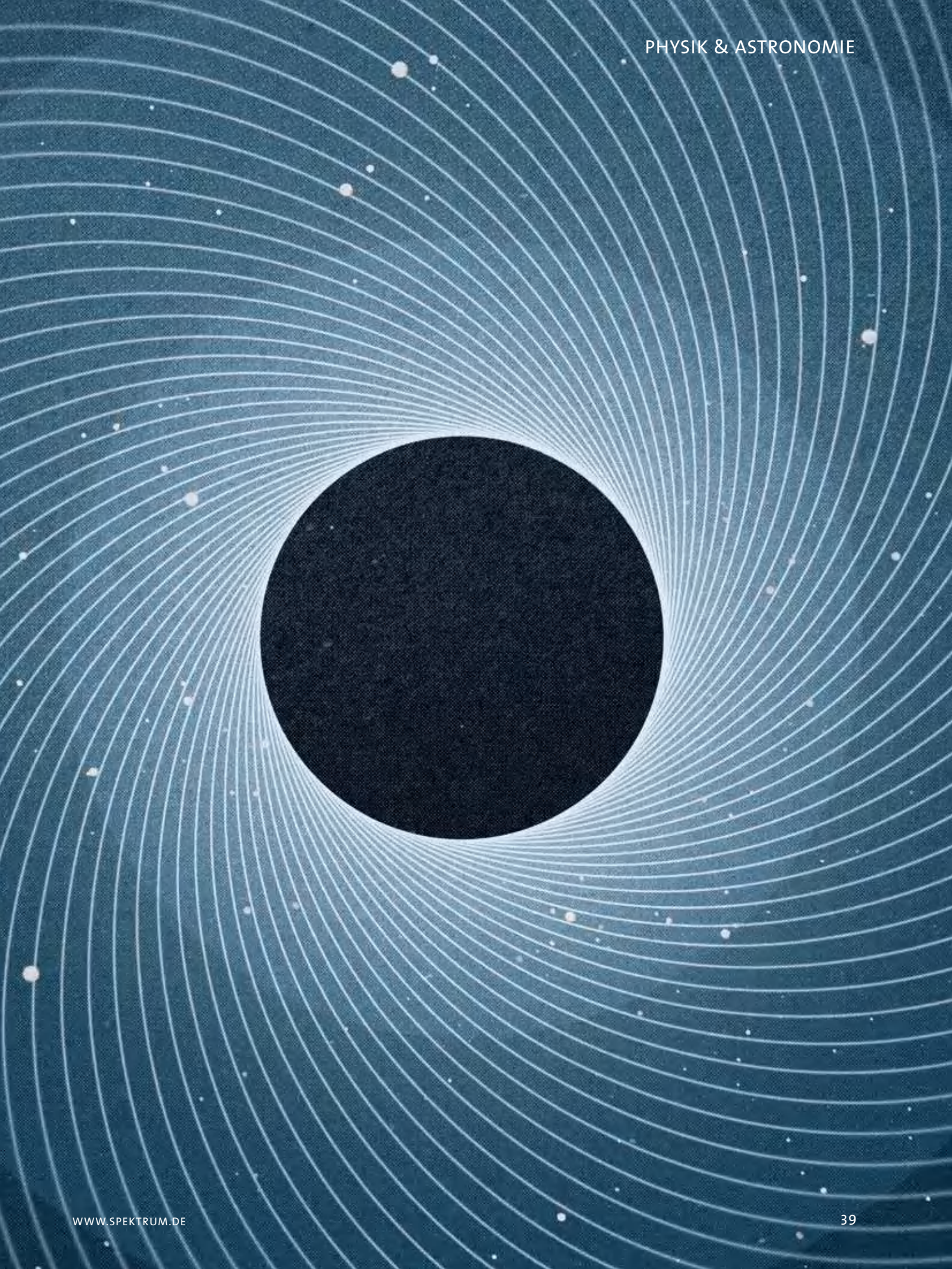
TITELTHEMA: ASTROPHYSIK

Mittelgewichte unter den Schwarzen Löchern

Die dunklen Himmelsobjekte sorgen bei Astrophysikern für helle Begeisterung: Schwarze Löcher von knapp einer Million Sonnenmassen liefern Informationen über die Entstehung ihrer massereicheren Geschwister sowie ganzer Galaxien.

Von Jenny E. Greene

ALLE ILLUSTRATIONEN DES ARTIKELS: GAVIN POTENZA



Seit einigen Jahrzehnten wissen Astronomen, dass fast jede große Galaxie in ihrem Zentrum ein gigantisches Schwarzes Loch enthält – ein Objekt also, dessen Schwerkraft so groß ist, dass aus ihm nicht einmal Licht entweichen kann. Der Tod von Sternen kann kleine Schwarze Löcher produzieren – mit Massen von 3 bis 100 Sonnen. Sie sind aber winzig im Vergleich zu den Giganten in Galaxienzentren, die Millionen bis Milliarden Sonnenmassen schwer sind (siehe Kasten S. 46).

Diese supermassereichen Schwarzen Löcher stellen uns Forscher vor große Rätsel: Warum treten sie in Galaxien so häufig auf? Was war zuerst – die Galaxie oder das Schwarze Loch? Und schließlich: Wie sind sie entstanden? Das Rätsel wird noch dadurch vergrößert, dass es offenbar bereits im jungen Kosmos supermassereiche Schwarze Löcher gab. Im Juni 2011 berichtete ein Astronomenteam über die Entdeckung des bislang ältesten solchen Objekts: Bereits vor 13 Milliarden Jahren, also gerade mal 770 Millionen Jahre nach dem Urknall, enthielt es bereits zwei Milliarden Sonnenmassen. Wie konnte es in so kurzer Zeit zu solcher Größe anwachsen?

Eine derart schnelle Entstehung dieser Objekte ist verblüffend. Denn Schwarze Löcher haben nicht nur eine Reputation als gewaltige »Staubsauger«, sondern auch als »Laubbläser«. Wenn nämlich Gas auf ein Schwarzes Loch zustürzt, dann akkumuliert es sich zunächst in einer großen rotierenden Scheibe, die um den Massegiganten kreist: in der so genannten Akkretionsscheibe. Dort heizt sich die Materie auf und sendet Strahlung aus, und zwar umso mehr, je mehr sie sich dem Punkt ohne Wiederkehr am inneren Rand der Scheibe nähert. Nachfolgende einfallende Materie wird durch diese Strahlung jedoch wieder fortgeblasen und begrenzt so das mögliche Wachstum durch Akkretion, also das Einverleiben von Gas und Staub aus der galaktischen Umgebung. Physiker haben berechnet, dass ein Schwarzes Loch, das sich andauernd Materie mit der maximalen Rate einverleibt, alle 50 Millionen Jahre seine Masse verdoppeln kann. Das aber ist viel zu langsam, um in knapp einer Milliarde Jahren aus einem ursprünglich stellaren Schwarzen Loch ein Milliarden-Sonnenmassen-Monster zu machen.

AUF EINEN BLICK

DIE ENTDECKUNG DER MITTELKLASSE

1 **Schwarze Löcher mit Milliarden Sonnenmassen** gab es bereits im frühen Universum. Das rasche Wachstum dieser Giganten ist noch immer ein großes Rätsel der Astronomie.

2 Zwei Szenarios halten Astronomen für möglich: das **Verschmelzen** zahlreicher kleiner Schwarzer Löcher, die aus kollabierenden Sternen entstanden. Oder es kollabierten direkt **gewaltige Wolken aus kosmischem Urgas** zu großen Schwarzen Löchern.

3 Astronomen versuchen diese Rätsel zu lösen, indem sie nach übrig gebliebenen **Schwarzen Löchern mit mittlerer Masse** suchen. Erste Hinweise zeigen, dass mittelgroße Schwarze Löcher, die durch einen direkten Kollaps entstanden, vor allem im frühen Universum eine wichtige Rolle spielten.

Astrophysiker haben deshalb zwei Wege vorgeschlagen, wie sich die »Saatkörner« der supermassereichen Schwarzen Löcher bilden können. Die ursprüngliche, bereits vor vielen Jahren entwickelte Idee geht davon aus, dass die ältesten großen Schwarzen Löcher tatsächlich die Überreste explodierter Sterne sind. Die ersten Sonnen im Kosmos hatten vermutlich im Vergleich zu heutigen Sternen extrem große Massen. Der Grund dafür ist, dass die Wolken aus dem kosmischen Urgas noch kaum schwerere Elemente enthielten, die das Gas stark abkühlen und so kleinere Verdichtungen hätten ermöglichen können.

Wie konnten die Monster so schnell wachsen?

Die riesigen Sterne waren schnell ausgebrannt und produzierten Schwarze Löcher mit etwa der 100-fachen Sonnenmasse. Danach muss ein Prozess eingesetzt haben, der diese Schwarzen Löcher anders und schneller anwachsen ließ als nur über die Akkretion. Eine Möglichkeit dazu bieten dichte Sternhaufen. In ihnen versammeln sich die größten Sterne (und Schwarzen Löcher) in der Nähe des Haufenzentrums. Zusammenstöße und Verschmelzungen von Schwarzen Löchern können dort die übliche Wachstumsbegrenzung überlisten und zu einem raschen Anwachsen auf 10 000 Sonnenmassen führen. Das weitere Wachstum kann dann wieder über gewöhnliche Akkretion voranschreiten, wobei vielleicht noch das eine oder andere große Schwarze Loch mit auf dem Menüplan steht.

Doch nach der Entdeckung von supermassereichen Schwarzen Löchern, die offenbar bereits in der Frühzeit des Universums existierten, fragten sich viele, wie stellare Schwarze Löcher in so kurzer Zeit derart große Massen erreichen konnten – selbst wenn sie ihr Leben schon mit einem beschleunigten Wachstum begonnen hatten. Daher suchten die Forscher nach Alternativen für die Entstehung der frühesten Schwarzen Löcher. Sie analysierten, wie sich größere Exemplare gebildet haben könnten als beim Sternentod.

Sie untersuchten Modelle, die sogar ganz ohne Sterne als Zwischenstadium auskommen. Stattdessen soll eine riesige Gaswolke direkt zu einem Schwarzen Loch kollabieren – ohne Umweg über eine Sternexplosion. Dieser Prozess könnte, so zeigten Berechnungen, Schwarze Löcher von 10 000 bis 100 000 Sonnenmassen hervorbringen, was die rasche Entstehung supermassereicher Schwarzer Löcher erlauben würde. Heute ist ein solcher direkter Kollaps mangels ausreichender Gaswolken nicht mehr möglich, aber im jungen Kosmos herrschten eben andere Bedingungen.

Leider lässt sich nur schwer herausfinden, welches dieser beiden Szenarios verwirklicht wurde – ob supermassereiche Schwarze Löcher von sterbenden Riesensternen ausgingen oder ob sie durch den Kollaps von Gaswolken entstanden. Die Astronomen können zwar weit zurück in die Zeit schauen, indem sie mit ihren Fernrohren in große Entfernungen blicken, doch sie können nicht darauf hoffen, die Entstehung der ersten Schwarzen Löcher direkt zu beobachten. Selbst die größten dieser Objekte wären aus so enor-

mer Entfernung mit heutiger Technik nicht zu erkennen. (Das James Webb Space Telescope könnte sie vielleicht aufspüren, aber sein Start wird nicht vor 2018 stattfinden – wenn es überhaupt die politischen Machtkämpfe um seine Finanzierung übersteht.) Gemeinsam mit Kollegen habe ich daher einen anderen Weg beschritten: Wir suchten nach unveränderten Schwarzen Löchern aus der Frühzeit, die nicht zu supermassereichen Monstern angewachsen sind, sondern – aus welchen Gründen auch immer – auf halbem Weg stehen blieben.

Gingen supermassereiche Schwarze Löcher von Sternen aus, dann sollten viele von ihnen übrig geblieben sein, sowohl in den Zentren als auch in den Randgebieten von Galaxien. Denn die ersten Sterne sind überall verglüht. Außerdem würden wir dann viele Schwarze Löcher in einem Bereich von 100 bis 100 000 Sonnenmassen erwarten, da ein Mangel an Nachschub ihr Wachstum an jedem Punkt der Entwicklung unterbrochen haben könnte.

Wären sie dagegen eher durch direkten Gaskollaps entstanden, dann gäbe es nur noch wenige von ihnen, denn ein direkter Kollaps ist viel seltener als eine Supernova. Statt eines weiten Bereichs hätten die meisten der aus kosmischer Frühzeit stammenden Schwarzen Löcher Massen von über 100 000 Sonnen. Die Modelle legen dies nämlich als typische Masse für die Objekte nahe.

Überraschend verdoppelte Massenwerte

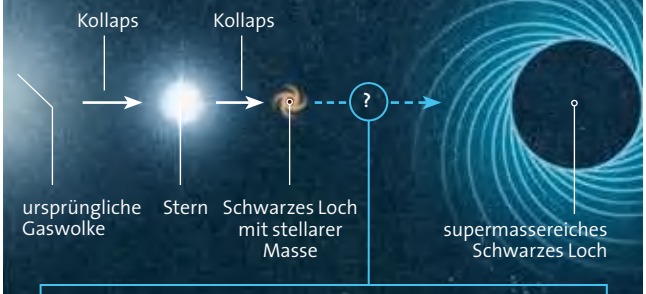
Wie andere Forscher auch habe ich mich deshalb auf die Suche nach dieser neuen Art von Schwarzen Löchern gemacht: Wir wollten nachsehen, ob die Häufigkeit und der Massenbereich solcher Objekte besser mit dem Sternkollaps- oder dem Gaswolkenkollapsmodell übereinstimmte. Als wir vor sieben Jahren mit der Suche begannen, war die Lage alles andere als viel versprechend. Astronomen kannten damals erst ein einziges Schwarzes Loch mittlerer Masse und hielten es daher für eine Ausnahme. Doch inzwischen haben wir hunderte weitere entdeckt.

Was genau zählt als »mittlere Masse«? In diesem Artikel meine ich damit den Bereich von 1000 bis zwei Millionen Sonnenmassen. Die obere Grenze ist ein wenig beliebig, sie schließt jedoch die kleinsten bekannten supermassereichen Schwarzen Löcher aus, wie zum Beispiel das Objekt im Zentrum der Milchstraße mit gut vier Millionen Sonnenmassen. Aber alle diese Grenzen verlaufen ohnehin etwas unscharf. Denn in der Praxis erweist sich die Massebestimmung eines Schwarzen Lochs zumeist als relativ unsicher. So mussten alle Massenwerte der zuerst entdeckten mittelgewichtigen Schwarzen Löcher vor einigen Jahren in etwa verdoppelt werden, als neue Daten eine bei den Berechnungen benutzte physikalische Größe korrigierten. Entscheidend ist, was die Astronomen in den kommenden Jahren über die Gesamtheit der Schwarzen Löcher unterhalb des supermassereichen Bereichs herausfinden werden – unabhängig davon, wo diese Grenze genau gezogen wird. Doch auch schon das, was wir bis heute über die Mittelgewichte gelernt haben, hat uns eine

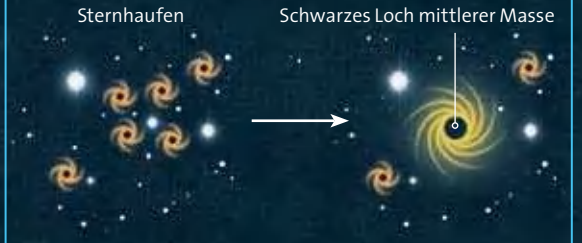
Evolution

Wie entstanden supermassereiche Schwarze Löcher?

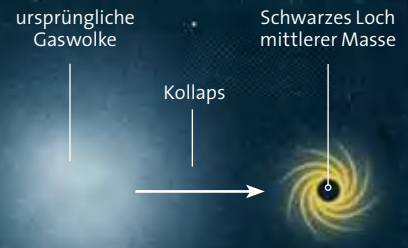
Schon im frühen Universum gab es gewaltige Schwarze Löcher mit Massen von mehr als einer Milliarde Sonnen. Bisher nahmen Forscher an, dass diese Objekte als stellare Schwarze Löcher, also durch den Kollaps eines ausgebrannten Sterns, entstanden sind. Doch solch ein kleines Schwarzes Loch kann nicht schnell genug wachsen, um so früh schon so massereich zu werden (obere Grafik). Daher bleibt die Frage: Wie können größere Schwarze Löcher als »Saatkörner« für supermassereiche Schwarze Löcher entstanden sein (Mitte und unten)?



Eine mögliche Erklärung lautet, dass ein großes stellares Schwarzes Loch in einem Sternhaufen relativ rasch auf 10 000 Sonnenmassen anwachsen kann, indem es viele andere Schwarze Löcher verschlingt. Ein so entstandenes Mittelgewicht kann dann durch einstürzendes Gas weiter zu einem supermassereichen Schwarzen Loch anwachsen.



Eine andere Möglichkeit: Eine Gaswolke kollabiert direkt zu einem Schwarzen Loch mittlerer Masse. Auch ein solches Schwarzes Loch könnte dann durch einfallendes Gas weiter anwachsen.



Die Suche nach Schwarzen Löchern mittlerer Masse soll klären, welches dieser Szenarios zutrifft.

Ein Bestimmungsbuch

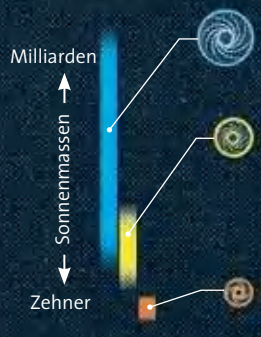
Wo unterschiedliche Typen von Schwarzen Löchern hausen

Es gibt viele Arten von Galaxien, einige davon enthalten supermassereiche Schwarze Löcher. Unsere Galaxie, die Milchstraße, ist eine Scheiben- oder Spiralgalaxie mit einem Bulge (Ausbeulung), einer großen, dichten Ansammlung von Sternen ❶. Im galaktischen Zentrum wurde ein supermassereiches Schwarzes Loch mit vier Millionen Sonnenmassen entdeckt (blau). In der Milchstraße haben Astronomen außerdem viele stellare Schwarze Löcher (orange) entdeckt. Der Kugelsternhaufen M15 beherbergt möglicherweise ein Schwarzes Loch mit einer Masse von einigen tausend Sonnen.

Galaxien mit Bulge und große elliptische Galaxien ❷ scheinen alle ein supermassereiches Schwarzes Loch zu enthalten. Im Gegensatz dazu kommen Schwarze Löcher mittlerer Masse (❸, gelb) bevorzugt in Galaxien ohne großen Bulge vor.

Klassifizierung Schwarzer Löcher

In Abhängigkeit von ihrer Masse fallen die bekannten Schwarzen Löcher in drei Kategorien. Die Massen der Schwarzen Löcher werden üblicherweise in Sonnenmassen oder einfach in »Sonnen«-Einheiten angegeben.

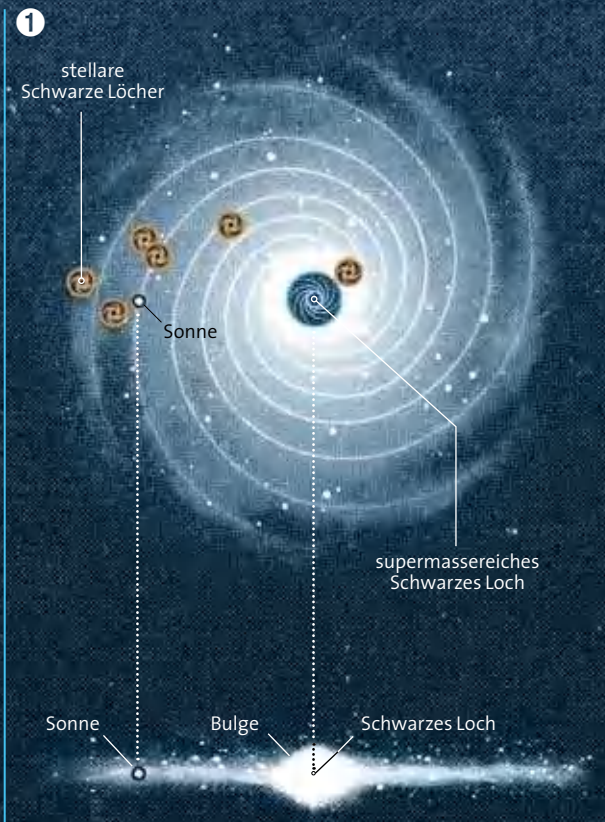


Supermassereiche Schwarze Löcher
Millionen bis Milliarden Sonnen schwer, entdeckt in den Kernen von großen elliptischen Galaxien oder Galaxien mit Bulge

Schwarze Löcher mittlerer Masse
1000 bis zwei Millionen Sonnen. Bei ihnen handelt es sich möglicherweise um übrig gebliebene Schwarze Löcher aus der kosmischen Frühzeit, die nicht zu supermassereichen Dimensionen angewachsen sind.

Stellare Schwarze Löcher
Bekannte Beispiele liegen im Bereich von 4 bis 30 Sonnen. Sie entstehen, wenn Sterne kolla-bieren. Theoretisch können so Schwarze Löcher mit bis zu 100 Sonnenmassen entstehen.

NICHT MASSSTABSGETREU



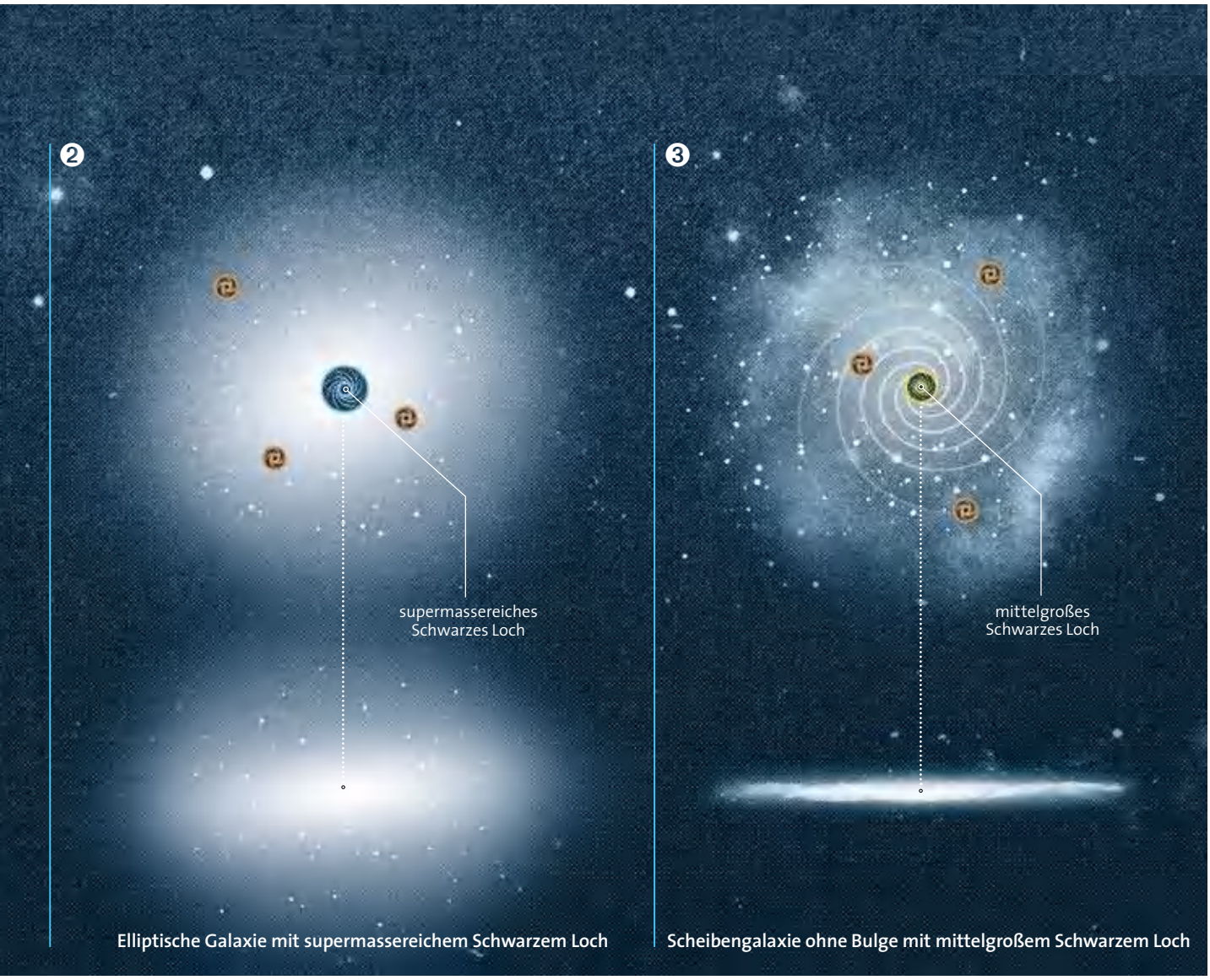
Scheibengalaxie mit Bulge (wie die Milchstraße) und supermassereichem Schwarzem Loch

neue Sicht auf die Wechselwirkung zwischen Schwarzen Löchern und ihren Heimatgalaxien eröffnet.

Schwarze Löcher können sich auf mehrere Arten bemerkbar machen. So liefern beispielsweise Sterne, die auf engen Bahnen um das Zentrum einer Galaxie rasen, verräterische Indizien für solche überschweren Zentralobjekte. Jene mittlerer Masse sind jedoch zu klein, um sich auf diese Weise durch ihre Anziehungskraft zu verraten. Die Forscher konzentrieren sich daher auf »aktive« Schwarze Löcher – also solche, bei denen heiße, einstürzende Materie ungeheure Strahlungsmengen aussendet, die sich beobachten lassen.

In langjährigen Suchkampagnen wiesen Astronomen nach, dass sich aktive Schwarze Löcher bevorzugt in Galaxien eines bestimmten Typs aufhalten. Galaxien, insbesondere jene mit großen Massen, treten in zwei verschiedenen Arten auf: als Spiral- oder Scheibengalaxien wie unsere eigene, mit einer großen rotierenden Scheibe von Sternen, die von der Seite betrachtet einem Teller ähneln; und als elliptische Galaxien, die letztlich Haufen von Sternen sind.

Einige Scheibengalaxien bergen in ihrem Zentrum sogar kleine elliptische Galaxien, die Fachleute als »Bulges« (Ausbeulungen) bezeichnen. Aktive Schwarze Löcher treten vor allem in elliptischen Galaxien auf, außerdem in Scheibengalaxien mit ausgeprägten Bulges. In nahezu jeder dieser Kernregionen, deren Abstand zu uns klein genug ist, um eine genaue Untersuchung zu erlauben, haben die Astronomen ein Schwarzes Loch mit der millionen- oder gar milliardenfachen Sonnenmasse entdeckt. Ein größerer Bulge hat außerdem, so zeigen die Daten, auch ein größeres Schwarzes Loch – typischerweise wiegt es ein Tausendstel der Bulge-Masse. Dieser Zusammenhang überraschte die Astronomen: Denn er bedeutet, dass sich Galaxien und ihre Schwarzen Löcher gemeinsam entwickelt haben müssen – auf eine Art und Weise, welche die Forscher bislang noch nicht verstanden haben. Diese Beziehung zeigt den Forschern aber auch, wo sie nach den Mittelgewichten Ausschau halten müssen: vor allem bei den kleinsten Galaxien. Aber bei welchen von ihnen? Ein rätselhafter Vertreter dieser Gattung führte auf die rich-



tige Spur. Der Astronom Luis C. Ho von den Carnegie Observatories in Pasadena, Kalifornien, hatte sich 1995 für seine Doktorarbeit rund 500 nahe, helle Galaxien vorgeknöpft. Dabei war ihm aufgefallen, dass die meisten Galaxien mit großen Bulges auch aktive Schwarze Löcher enthalten, solche ohne Bulges dagegen nicht.

Allerdings gab es eine interessante Ausnahme: die Scheibengalaxie NGC 4395 im Sternbild Jagdhunde, 14 Millionen Lichtjahre entfernt. Sie besitzt ein aktives Schwarzes Loch, jedoch keinen Bulge. Hos eigener Doktorvater hatte diese Kuriosität bereits 1989 bemerkt, doch die meisten Forscher sahen darin nicht mehr als eine Anomalie. Immerhin: Davon abgesehen bestätigte die Arbeit von Luis C. Ho die generelle Regel, dass Galaxien ohne Bulge auch keine aktiven Schwarzen Löcher enthalten.

Die Masse des Schwarzen Lochs in der merkwürdigen Galaxie genau zu bestimmen, war eine Herausforderung. Das direkteste astronomische Verfahren misst die Umlaufbahnen von Begleitobjekten. So kann man aus Geschwindigkeit und Umlaufbahn etwa der Erde die Masse der Sonne ableiten. Ganz ähnlich errechnet sich in einer Galaxie aus den Bahnen von Sternen die Masse des zentralen Schwarzen Lochs – aber nur, wenn es groß genug ist, um mit seiner Schwerkraft die Bewegung der Sterne messbar zu beeinflussen. Leider ist dieser Effekt beim Schwarzen Loch in NGC 4395 viel zu klein.

Deshalb mussten die Astronomen auf indirekte Verfahren ausweichen – auf die Messung von Röntgenstrahlung. So ist der Energieausstoß eines Schwarzen Lochs zeitlich variabel: Je größer das Objekt, desto langsamer variiert das ausgesandte Röntgenlicht. Der Astronom David C. Shih und seine Kollegen von der University of Cambridge entdeckten 2003, dass die Röntgenwellen von NGC 4395 sich sehr rasch verändern. Entsprechend musste die Masse relativ klein sein – vermutlich nur 10 000- bis 100 000-mal jene der Sonne. Luis C. Ho ermittelte im gleichen Jahr einen ähnlichen Wert.

Dem Astronomen Bradley M. Peterson von der Ohio State University und seinen Mitarbeitern gelang es 2005, die Masse

etwas direkter zu bestimmen. Das Team nutzte dazu das mächtige Hubble Space Telescope und ein Verfahren namens Reflexionskartierung. Es basiert auf der Bewegung von Gaswolken, die um ein Schwarzes Loch kreisen. Anhand der zeitlichen Verzögerung von Lichtechos, die an den Wolken reflektiert wurden, lassen sich nämlich ihre Umlaufbahnen ableiten. Peterson und sein Team folgerten, dass das Schwarze Loch etwa 360 000 Sonnenmassen haben sollte. Doch auch mit dieser Methode bleibt die Unsicherheit auf Grund bestimmter Annahmen, die in die Berechnungen eingingen, noch groß – etwa bei dem Faktor drei.

Verblüffende Ähnlichkeit zweier Galaxien

Die kuriose Galaxie NGC 4395 scheint damit genau die Art von Schwarzem Loch mittlerer Masse zu beherbergen, nach der wir suchen. Doch von Hos 500 Galaxien ist sie die einzige ohne Bulge, aber mit klaren Hinweisen auf ein aktives Schwarzes Loch. Ein zweites Exemplar dieser Spezies hatte im Jahr 2002 Aaron J. Barth entdeckt. Der damals am California Institute of Technology tätige Astronom hatte mit dem Keck-II-Teleskop auf Hawaii ein Spektrum der ungewöhnlichen, aber bis dahin kaum untersuchten Galaxie POX 52 aufgenommen. Ähnlich wie bei NGC 4395 gab es auch bei diesem Objekt einige Anzeichen für ein aktives Schwarzes Loch, obwohl es eigentlich nicht zu den üblichen Verdächtigen für ein supermassereiches Zentralobjekt zählte. POX 52 hat fast Kugelform (»sphäroidal«), ist also ein seltener Galaxientyp, der sich sowohl von den elliptischen als auch von den Scheibengalaxien mit einem Bulge unterscheidet.

Barth schickte Ho sein frisch beobachtetes Spektrum von POX 52. Dieser schaute nur kurz darauf und fragte Barth sofort: »Wo hast du ein derart schönes Spektrum von NGC 4395 gefunden?« Die Daten beider Galaxien ähnelten sich so sehr, dass selbst Ho sie nicht unterscheiden konnte. Demnach verrät sich die Anwesenheit eines Schwarzen Lochs durch bestimmte Merkmale im Spektrum.

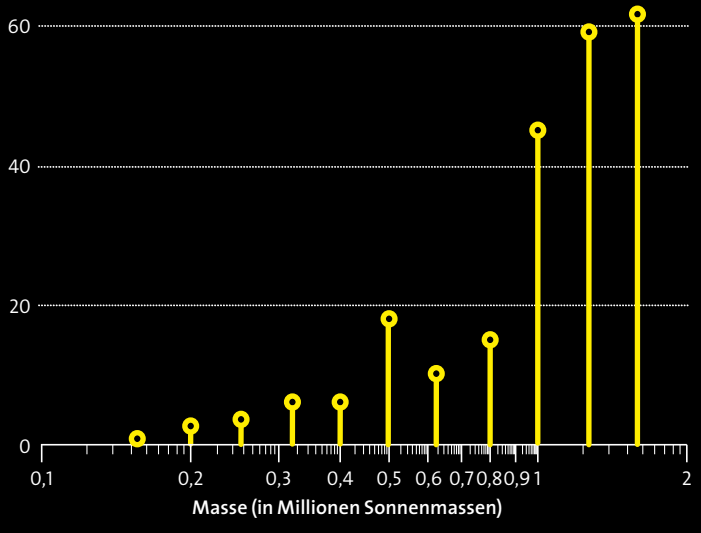
Da POX 52 rund 300 Millionen Lichtjahre von uns entfernt ist – 20-mal weiter als NGC 4395 –, lässt sich die Masse ihres Schwarzen Lochs nur indirekt abschätzen. Trotzdem deutet alles darauf hin, dass die Galaxie ein zentrales kompaktes Objekt mit etwa der 100 000-fachen Sonnenmasse beherbergt. Damit enthielt die Klasse der Schwarzen Löcher mittlerer Masse bereits zwei Exemplare.

Doch um das Rätsel der Entstehung supermassereicher Schwarzer Löcher zu lösen, benötigt man natürlich viel mehr Objekte. Dann erst lassen sich die kritischen Fragen angehen: Wie häufig sind Schwarze Löcher mittlerer Masse? Enthält jede Galaxie ohne Bulge eines – oder sind das nur seltene Ausnahmen? Gibt es diese Himmelskörper auch noch an anderen Orten? Und existieren noch kleinere Exemplare als die zwei bislang aufgespürten? Nur wenn Astrophysiker diese Rätsel klären, können sie verstehen, wie die ersten Schwarzen Löcher entstanden und welche Rolle sie im frühen Universum spielten.

Leider eignen sich die Standardverfahren nur schlecht für eine solche Fahndung. Je größer die Objekte sind, desto mehr Materie können sie verschlingen und desto heller strahlen sie auch. Aber kleinere Schwarze Löcher leuchten nur schwach und sind deshalb schwer aufzuspüren. Doch es gibt auch gute Nachrichten. Elliptische Galaxien, in denen die großen Schwarzen Löcher typischerweise vorkommen, erweisen sich als außerordentlich beobachtungsfreundlich.

Gefundene Mittelgewichte

Die Indizien favorisieren bisher das Gas-Kollaps-Szenario



Anzahl der Schwarzen Löcher mittlerer Masse, die Astronomen über die Untersuchung optischer Strahlung bis heute aufspürten

Die Beobachtung der optischen Strahlung von 500 000 Galaxien hat zur Entdeckung von über 100 Schwarzen Löchern mit weniger als zwei Millionen Sonnenmassen geführt. Weitere Suchaktionen im mittleren Infrarot-, Röntgen- und Radiobereich haben weitere Kandidaten erbracht. Die bisherigen Daten sprechen dafür, dass die meisten Galaxien ohne Bulge keine mittelgroßen Schwarzen Löcher enthalten – bei den anderen handelt es sich zumeist um ein größeres Exemplar. Diese Beobachtungen unterstützen das Szenario, in dem Gaswolken direkt zu großen Schwarzen Löchern kollabieren. Denn wenn supermassereiche Schwarze Löcher aus kollabierten Sternen hervorgegangen wären, müssten alle derartigen Galaxien mindestens 10 000 Sonnenmassen haben.

JEN CHRISTIANSEN, NACH: GREENE, J. E., HO, L. C.: A NEW SAMPLE OF LOW-MASS BLACK HOLES IN ACTIVE GALAXIES. IN: ASTROPHYSICAL JOURNAL 670, S. 92–104, 2007

Die Sterneninseln enthalten kaum Gas und erzeugen daher kaum neue Sterne. Das gestattet uns einen weit gehend ungehinderten Blick in ihr Zentrum. Im Gegensatz dazu entstehen in Scheibengalaxien – wo die Astronomen die meisten Schwarzen Löcher mittlerer Masse vermuten – laufend neue Sterne. Deren Strahlung sowie die damit verbundenen Wolken aus Gas und Staub können ein aktives Schwarzes Loch verdecken.

Um die Hindernisse zu überwinden, haben mein Doktorvater Ho und ich uns einer Datensammlung zugewendet, die dafür prädestiniert ist, Nadeln im kosmischen Heuhaufen zu finden: dem Sloan Digital Sky Survey. Seit dem Jahr 2000 hat ein ausschließlich diesem Projekt gewidmetes Teleskop im US-Bundesstaat New Mexico ein Viertel des Himmels fotografiert und dabei die Spektren von Millionen von Sternen und Galaxien aufgezeichnet.

Wir haben 200 000 Galaxienspektren durchforstet und sind dabei auf 19 neue Kandidaten für unser Projekt gestoßen: kleine Galaxien ähnlich wie NGC 4395, die aktive Schwarze Löcher mit weniger als einer Million Sonnenmassen enthalten. Weitere derartige Suchaktionen haben in den vergangenen Jahren auf der Basis neuerer Sloan-Daten die Gesamtzahl solcher Objekte auf rund drei Dutzend erhöht, hinzu kamen noch mehr als 100 mit einer Masse knapp über der Millionen-Sonnen-Grenze.

Keine direkte Massebestimmung möglich

Die Methode, mit der die Massen bestimmt wurden, ist eher indirekt. Die Spektren der Sloan-Durchmusterung liefern Informationen darüber, wie schnell sich das Gas um das Schwarze Loch bewegt. Für eine direkte Berechnung der Masse, wie sie die Astronomen am liebsten hätten, ist das aber nur die Hälfte der erforderlichen Informationen, die nötig wären. Die andere Hälfte betrifft den Durchmesser der Umlaufbahn, womit sich dann über die keplerschen Gesetze die Masse des Zentralobjekts direkt ableiten ließe. Ohne diese Daten behelfen sich die Forscher anders. Sie wissen durch Beobachtungen: je kleiner die Masse eines aktiven supermassereichen Schwarzen Lochs, desto geringer auch die Umlaufgeschwindigkeit der Gaswolken. Eine Extrapolation dieses Trends zu etwas niedrigeren Massen ermöglichte es uns, die neuen Objekte aus den Sloan-Daten herauszupicken.

Die Durchmusterung bestätigte, was wir auf Basis von NGC 4395 und POX 52 bereits vermutet hatten – es gibt tatsächlich eine größere Population von Schwarzen Löchern mittlerer Masse. Und, was wir ebenfalls erwartet hatten: Diese Himmelskörper finden sich überwiegend in Galaxien ohne Bulges. Trotzdem scheinen die Mittelgewichte vergleichsweise selten zu sein. Nur eine von 1000 Galaxien, die hell genug strahlen, um bei der Sloan-Durchmusterung erfasst zu werden, liefert auch Hinweise auf ein solches Objekt.

Doch unsere Methode könnte auch viele Schwarze Löcher übersehen. Schließlich basiert sie nur auf Beobachtungen im optischen Bereich – also den Wellenlängen, die wir mit unseren Augen sehen können. In diesem Fenster können jedoch

Staubwolken die Schwarzen Löcher verdecken. Um das Problem zu umschiffen, nutzen die Himmelsbeobachter Wellenlängen, die auch Staub durchdringen können: Röntgen-, Radio- und Infrarotstrahlen.

Der Astronom Shobita Satyapal von der George Mason University in Fairfax, Virginia, suchte im Infrarotbereich nach Anzeichen verborgener aktiver Schwarzer Löcher in Galaxien ohne Bulge. In ein solches Objekt einfallende Materie sendet Röntgenstrahlung aus, die im umgebenden Gas ungewöhnliche chemische Elemente produziert, zum Beispiel angeregte Zustände hoch ionisierter Neonatome. Emissionen der Ionen hinterlassen im mittleren Infrarotspektrum charakteristische Fingerabdrücke. Es gibt aber nur wenige Galaxien, die sich für diese Art von Suche wirklich eignen. Deshalb ist Satyapals Team auch nur auf wenige Schwarze Löcher mittlerer Masse gestoßen. Andere Astronomen haben aber im Röntgen- und Radiobereich weitere Hinweise auf solche Himmelskörper gefunden. Nachfolgebeobachtungen, mit denen diese Kandidaten bestätigt werden sollen, laufen derzeit.

Alle Beobachtungen deuten bisher darauf hin, dass die rein optische Suche tatsächlich zahlreiche Galaxien ohne Bulge übersieht, in denen Schwarze Löcher mittlerer Masse hinter Staub verborgen liegen. Das endgültige Ergebnis steht zwar noch aus, aber vermutlich enthalten nur 5 bis 25 Prozent der Galaxien ohne Bulge auch ein Schwarzes Loch mittlerer Masse, das groß genug ist, um entdeckt werden zu können.

Solche Informationen könnten uns dabei helfen, den Zusammenhang zwischen größeren Schwarzen Löchern und großen Bulges aufzuklären. Wie schon erwähnt, haben supermassereiche Schwarze Löcher in solchen Galaxien typischerweise ein Tausendstel der Masse der Zentralregion. Das Wachstum eines großen Schwarzen Lochs scheint also eng an das Wachstum seiner Umgebung geknüpft zu sein. Wenn sich diese Korrelation aber bereits in der Entstehungsphase einstellt, dann sollte es eigentlich keinen Zusammenhang zwischen den Eigenschaften von Galaxien ohne Bulge und ihren mittelgewichtigen Schwarzen Löchern geben.

Laut den meisten Forschern entstehen elliptische Galaxien und große Bulges durch die Verschmelzung von Spiral-

galaxien. Im Verlauf dieser Fusion verquirlen sich die Scheibensterne kräftig. Die Sterne kreisen danach nicht mehr nur innerhalb der Scheibe, sondern auf zufälligen Bahnen in einer Kugel (dem neuen Bulge oder der elliptischen Galaxie). Gaswolken kollidieren während der Verschmelzung miteinander, bewegen sich zum galaktischen Zentrum und lösen dort einen mächtigen Ausbruch von Sterngeburten aus, der die Gesamtmasse der Sterne in der Kernregion erhöht.

Währenddessen verschmelzen auch die zentralen Schwarzen Löcher der ursprünglichen Galaxien miteinander und fressen einen Teil der einströmenden Gaswolken. Durch die

Rekordmonster im All

Kürzlich entdeckten Astronomen zwei gigantische Schwarze Löcher mit jeweils zehn Milliarden Sonnenmassen.

Riesige Schwarze Löcher mit mehreren Milliarden Sonnenmassen faszinieren Fachleute ebenso wie Laien oder Sciencefiction-Autoren. Diese »supermassereichen Schwarzen Löcher« sind keineswegs nur theoretische Spitzfindigkeiten, sondern existieren tatsächlich in den Zentren großer Galaxien. Vor 15 Jahren haben Astronomen sie erstmals nachgewiesen – und bald wurde ihnen klar, dass solche Objekte die Entstehung und Entwicklung ganzer Galaxien erheblich beeinflussen können.

Das löste eine ganze Welle von Untersuchungen über die gemeinsame Evolution von Galaxien und Schwarzen Löchern aus. Jüngster Höhepunkt war im Dezember 2011 die sensationelle Entdeckung von zwei supermassereichen Schwarzen Löchern – den massereichsten, die je gefunden wurden. Die beiden Objekte sind jeweils etwa zehn Milliarden Sonnenmassen schwer und sitzen in den Zentren von NGC 3842 und NGC 4889: zwei Galaxien in einer Entfernung von 320 und 335 Millionen Lichtjahren, inmitten der Galaxienhaufen Leo und Coma.

Der Coup gelang einem Team von Astronomen unter der Leitung von Nicholas J. McConnell von der University of California in Berkeley mit Hilfe der Daten verschiedener Großteleskope *(Nature 480, S. 215–218, 2011)*. Bis dahin war das größte bekannte Schwarze Loch ein Objekt mit 6,3 Milliarden Sonnenmassen im Zentrum der elliptischen Galaxie M87 – 54 Millionen Lichtjahre von uns entfernt. Zum Vergleich: Jenes im Zentrum der Milchstraße bringt es gerade einmal auf 4,3 Millionen Sonnenmassen, weniger als ein Tausendstel davon.

Ursprünglich waren die Monsterlöcher von Theoretikern erdacht worden, um die intensive Strahlung zu erklären, die von Quasaren ausgesandt wird, einem Typ besonders aktiver Galaxien. Diese Punktstrahler finden sich vor allem in großen kosmologischen Entfernungen, als das Universum höchstens halb so alt war wie heute. Ihre enorme Helligkeit beruht auf erhitztem Gas, das sich in Richtung galaktisches Zentrum stark beschleunigt und dabei einen letzten Strahlungsblitz abgibt. Inzwischen ist dieses Gas aber weit gehend für die Bildung neuer Sterne aufgebraucht, was erklärt, warum wir in unserer kosmischen Umgebung keine Quasare mehr beobachten. Wenn allerdings supermassereiche Schwarze Löcher für die Quasarstrahlung verantwortlich sind, sollten sie quasi als Schläfer in den Zentren der massereichsten Galaxien noch nachzuweisen sein.

Dort stießen die Astronomen nun tatsächlich auf solche Objekte, für die sich die Masse auch zuverlässig bestimmen ließ. Doch sind sie im Allgemeinen zu klein, um die Strahlung der hellsten Quasare zu erklären. Ideale Wirtsgalaxien für die größten dieser Löcher sind schwere elliptische Galaxien, wie sie in der Zentralregion von Galaxienhaufen vorkommen. Die Sternansammlungen saugen Gas und Sterne von Nachbargalaxien auf und füttern ihr eigenes supermassereiches Schwarzes Loch. Allerdings ist der nächste Galaxienhaufen von der Erde über 300 Millionen Lichtjahre entfernt, was die Bestimmung der Masse eines mutmaßlichen Monsterlochs erschwert.

McConnell und sein Team nahmen sich jeweils eine zentrale elliptische Galaxie in zwei Galaxienhaufen vor. Mit den kombinierten Messdaten mehrerer Großteleskope wie dem Hubble Space Telescope sowie den Keck- und Gemini-Teleskopen auf Hawaii gelang es ihnen, die Bahnen von Sternen zu beobachten, die in den Zentren beider Galaxien jeweils ein sonst unsichtbares Objekt umkreisen. Damit konnten sie die Masse Letzterer zu mehr als zehn Milliarden Sonnenmassen bestimmen. Vermutlich handelt es sich um zwei der erwähnten Schläferobjekte, die im jungen Kosmos die Kraftwerke der hellsten Quasare bildeten.

Entstanden sind diese Monstergebilde vermutlich durch Gas, das sie laufend aus ihrer Heimatgalaxie aufsaugten, was aber zugleich die zentrale Ausbeulung (»Bulge«) der Galaxie anwachsen ließ. Der Prozess läuft so lange, bis die vom Schwarzen Loch ausgestrahlte Energie das nachstürzende Gas aufheizt und wieder ins All zurückdrängt. Die Beobachtungen weisen darauf hin, dass die neu entdeckten Superlöcher weniger durch das einstürzende Gas wuchsen, sondern vor allem durch die Verschmelzung gasarmer Nachbargalaxien.

Die Suche nach weiteren supermassereichen Schwarzen Löchern sieht viel versprechend aus: Mit Hilfe der nächsten Generation von 40-Meter-Teleskopen wie etwa dem European Extremely Large Telescope dürfte sich die Zahl der Galaxien, die detailliert analysiert werden können, dramatisch erhöhen.

Michele Cappellari
Der Autor ist Astronom am Department of Physics der University of Oxford.

© Nature Publishing Group
www.nature.com
Nature 480, S. 187–188, 2011

NGC 4395 ist eine Balkenspiralgalaxie im Sternbild Jagdhunde, die 14 Millionen Lichtjahre von uns entfernt ist. Sie war die erste Galaxie ohne Bulge, in deren Zentrum Astronomen ein Schwarzes Loch mittlerer Masse entdeckten.

ROBERT FRANKE, FOCAL POINTE OBSERVATORY

großräumigen Prozesse bei der Verschmelzung können supermassereiche Schwarze Löcher und große Bulges gemeinsam wachsen. Sobald das Zentralobjekt ein Tausendstel der Bulge-Masse erreicht hat, kehrt sich der Vorgang teilweise um, denn es agiert nun als »Laubbläser«: Mit seiner Strahlung bläst es Restgas aus dem Zentrum der Galaxie heraus und beendet so seine Wachstumsphase.

Kollabierende Gaswolken als Urheber

Mittelgewichte in Galaxien wie NGC 4395 kommen dagegen niemals in den Genuss einer solchen gemeinsamen Mahlzeit. Stattdessen verschlucken sie nur gelegentlich Gas aus dem Galaxienzentrum – kleine Happen ohne Bedeutung für die Entwicklung der Galaxie als Ganzes. In vielen Galaxien ohne Bulge wächst möglicherweise gar kein Schwarzes Loch heran. Ein Beispiel dafür ist die Scheibengalaxie M33, die ansonsten NGC 4395 ähnelt. M33 enthält eindeutig kein Schwarzes Loch mit einer Masse von mehr als 1500 Sonnen. Die Beweise für dieses Modell, welches das Wachstum der Zentralkörper mit der Entstehung der Bulges verknüpft, mehren sich, doch die Frage ist noch ungeklärt.

Wie sind nun die supermassereichen Schwarzen Löcher ursprünglich entstanden? Hier neigt sich die Waagschale zu Gunsten der Theorie des direkten Kollapses von Gaswolken im frühen Universum. Wenn stellare Schwarze Löcher, die durch Sternexplosionen entstanden, als Saatkörner supermassereicher Schwarzer Löcher dienten, dann sollten all diese Galaxien auch solche Objekte mit mindestens 10 000 Sonnenmassen enthalten. Es sieht jedoch so aus, als ob im Gegensatz zu NGC 4395 die meisten Galaxien ohne Bulge keine Schwarzen Löcher in ihrem Zentrum besitzen.

Auch andere Beobachtungen stützen das Szenario mit direktem Kollaps. So ähnelt die schwache Korrelation zwischen den Massen der Mittelgewichte und den Massen ihrer Wirtsgalaxien eher den Vorhersagen dieses Modells. Und es ist offenbar wesentlich einfacher, ein Schwarzes Loch mit der milliardenfachen Masse der Sonne zu produzieren, wenn man bereits mit einem massereicheren Schwarzen Loch startet.

Noch bleiben viele wichtige Fragen zu diesen Schwarzen Löchern neuen Typs offen:

- Treten die Mittelgewichte häufiger in speziellen Arten kleiner Galaxien auf? Das würde darauf hindeuten, dass sich Schwarze Löcher und ihre Galaxien bereits vor den Verschmelzungen, aus denen Bulges und supermassereiche Schwarze Löcher hervorgehen, auf bislang unbekannte Art gegenseitig beeinflussen.
- Gibt es in den meisten Galaxien ohne Bulge wirklich keine solchen Zentralobjekte? Oder sind ihre Schwarzen Löcher nur zu klein, um bislang entdeckt zu werden?
- Besitzen doch alle Galaxien ohne Bulge Schwarze Löcher mit 10 000 bis 100 000 Sonnenmassen, die kaum Licht oder Röntgenstrahlung aussenden?

Antworten auf diese Fragen könnte die Theorie der supermassereichen Schwarzen Löcher in neue Richtungen lenken.

DIE AUTORIN

Im Rahmen ihrer Doktorarbeit an der Harvard University untersuchte **Jenny E. Greene** Schwarze Löcher mittlerer Masse. Heute ist sie Assistant Professor für Astronomie an der Princeton University und arbeitet dort über die Strukturentwicklung von Galaxien.

QUELLEN

Greene, J. E.: Big Black Hole Found in Tiny Galaxy. In: Nature 470, S. 45–46, 2011

Greene, J. E., Ho, L. C.: Active Galactic Nuclei with Candidate Intermediate-Mass Black Holes. In: Astrophysical Journal 610, S. 722–736, 2004

Kormendy, J. et al.: *e Back Holes do not Correlate with Galaxy Disks or Pseudobulges. In: Nature 469, S. 374–376, 2011

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1139701**

INTERVIEW

Antirealistischer Querdenker

Schon als Teenager rebellierte **Leonard Susskind** gegen herkömmliche Ansichten. Heute ist er davon überzeugt, dass unsere Erkenntnisfähigkeit die Wirklichkeit niemals ganz zu erfassen vermag.

Von Peter Byrne

Mit Vorliebe heckt Leonard Susskind Ideen aus, die den physikalischen Status quo verändern. Vor 40 Jahren zählte der Theoretiker von der Stanford University im US-Bundesstaat Kalifornien zu den Begründern der Stringtheorie: Diese wurde zunächst nicht ernst genommen, gilt aber heute als führender Kandidat für eine vereinheitlichte Theorie der Natur. Jahrelang bestritt er Stephen Hawkings Annahme, dass Schwarze Löcher Objekte nicht nur verschlingen, sondern auch die in ihnen steckende Information unwiederbringlich vernichten – und damit die Quantenmechanik verletzen. Am Ende war es Hawking, der nachgab. Susskind trug auch zu dem modernen Konzept der Paralleluniversen bei, indem er den Begriff einer »Landschaft« von Stringtheorien prägte. Das zerstörte den Traum der Physiker, das Universum lasse sich als eindeutiges Ergebnis von Grundprinzipien erklären.

Letztlich meint Susskind, dass die Realität unsere begrenzte Anschauung überfordert. Damit steht er nicht allein. Schon in den 1920er und 1930er Jahren spalteten sich die Begründer der Quantenmechanik in Realisten und Antirealisten. Albert Einstein und andere Realisten behaupteten, die Physik müsse ein geistiges Abbild der objektiven Realität zu Stande bringen – und sei es noch so unvollkommen. Antirealisten wie Niels Bohr fanden, solche Abbilder seien zum Scheitern verurteilt; die Forscher sollten sich darauf beschränken, empirische Vorhersagen zu machen und zu überprüfen. Nach Susskinds Meinung rechtfertigen die Paradoxien der modernen Physik die Bedenken Bohrs.

Beispielhaft illustriert das sein Prinzip der Komplementarität Schwarzer Löcher. Es besagt, dass Objekte, die in ein Schwarzes Loch stürzen, ein zutiefst zweideutiges Schicksal erleiden. Vom Standpunkt des Objekts aus betrachtet durchquert es den so genannten Ereignishorizont des Schwarzen Lochs ohne Zwischenfall und wird erst bei Erreichen der Singularität im Zentrum zerstört. Doch für einen externen Beobachter wird das Objekt schon am Horizont vernichtet. Was also geschieht wirklich? Die Frage ist nach dem Komplementaritätsprinzip sinnlos: Beide Interpretationen treffen zu.

Eine verwandte Idee, die den Antirealismus stützt, ist das holografische Prinzip, das Susskind und der Nobelpreisträger Gerard 't Hooft von der Universität Utrecht (Niederlande) Mitte der 1990er Jahre formulierten. Demnach lassen sich die Ereignisse in einem bestimmten Raumzeitvolumen durch die Vorgänge auf seiner Oberfläche erklären. Gewöhnlich stellen wir uns bewegte Objekte in einem dreidimensionalen Raum vor, aber ebenso gut können wir dabei an flache Kleckse denken, die über eine zweidimensionalen Fläche gleiten. Was ist also die echte Realität: die Grenzfläche oder das Innere? Die Theorie gibt keine Antwort. Im holografischen Bild ist die Realität Ansichtssache.

Peter Byrne: *Wie kam der Sohn eines Klempners aus dem New Yorker Stadtteil Bronx dazu, das Wesen der Realität in Frage zu stellen?*

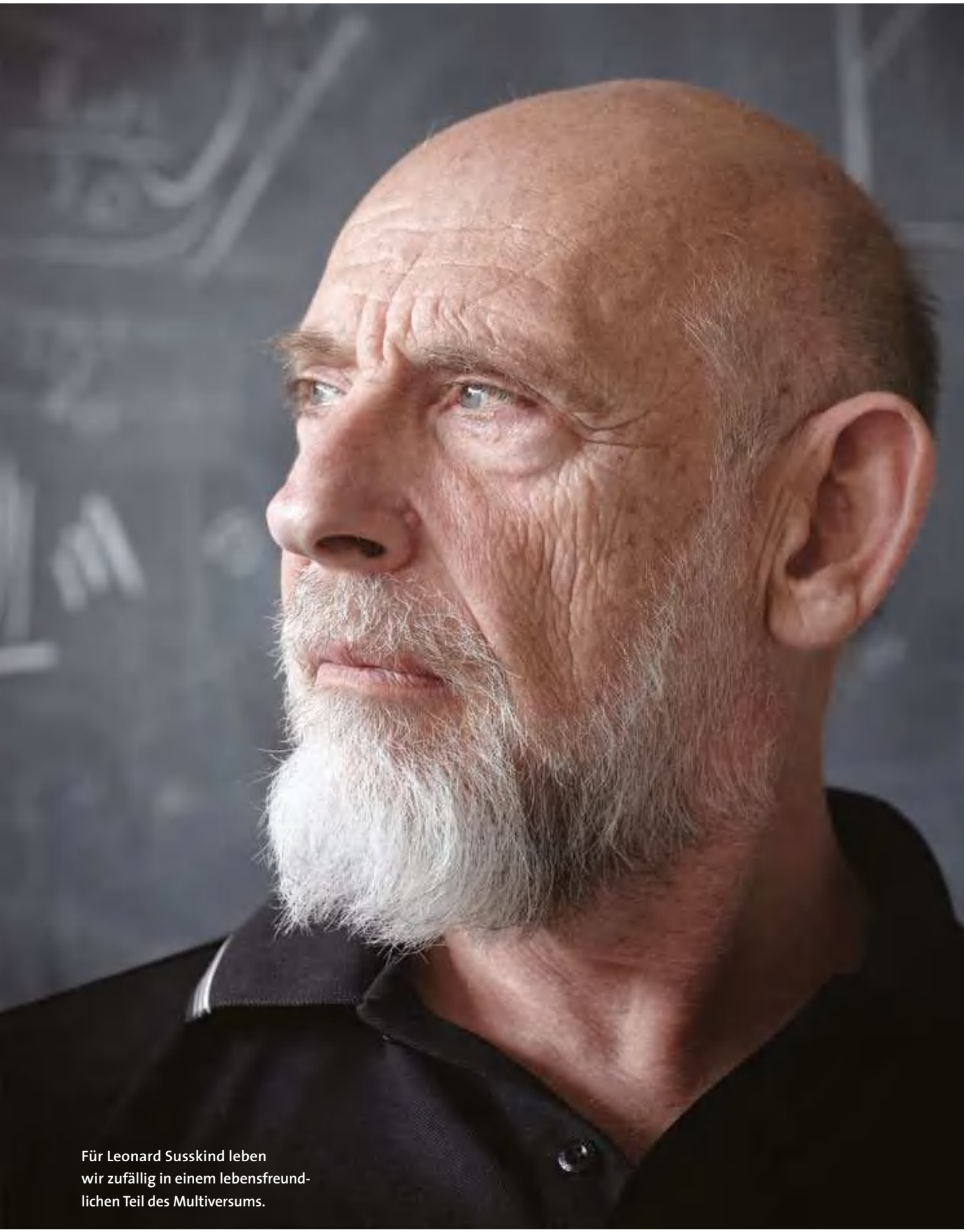
AUF EINEN BLICK

LEONARD SUSSKINDS PHILOSOPHIE

1 Der theoretische Physiker von der Stanford University gilt als **Pionier der Stringtheorie**, der Physik Schwarzer Löcher und des Multiversums.

2 Darüber hinaus stellt Susskind philosophische Fragen nach dem grundlegenden **Wesen der physikalischen Realität**.

3 Seine Antwort lautet: Wir werden über diese Realität wohl **keine endgültige Aussagen** machen können. Das Universum und seine Bestandteile lassen sich nicht eindeutig beschreiben.



Für Leonard Susskind leben wir zufällig in einem lebensfreundlichen Teil des Multiversums.

TIMOTHY ARCHIBALD

Leonard Susskind: Ich war ein schlechter Schüler – sehr gut in Mathematik, aber sonst ein schlimmer Junge mit vielen Scherereien. Deshalb durfte ich erst nicht Physiker werden, sondern lernte zunächst Automechaniker. Aber in der Ausbildung hatte ich erstmals Physik und war darin gleich weitaus besser als alle anderen, sogar besser als der Lehrer. Zum Glück machte er sich nichts daraus. Dann sagte mir ein anderer Techniklehrer, ich würde mich wohl eher nicht zum Ingenieur eignen. Damit hatte er Recht. Ich fragte ihn: Was soll ich tun? Er sagte: Na ja, du bist ungewöhnlich schlau. Du solltest Wissenschaftler werden.

Haben Sie auch Philosophievorlesungen besucht?

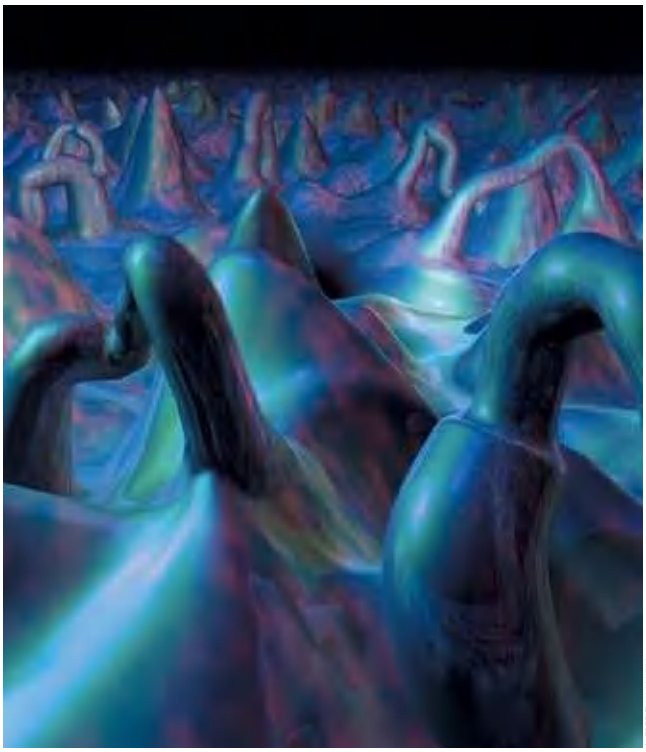
Susskind: Ja, anfangs schon. Von einigen Gedanken war ich ziemlich fasziniert. Aber als ich voll in die Physik einstieg, verlor ich das Interesse.

Gibt es Wissenschaftsphilosophen, die Ihnen zusagen?

Susskind: Ich gehöre, soweit ich weiß, zu den wenigen Physikern, die den amerikanischen Wissenschaftshistoriker und -soziologen Thomas Kuhn (1922–1996) mögen. Von ihm stammt die Idee des Paradigmenwechsels, eines plötzlichen, radikalen Wandels in der Wissenschaft. Gelegentlich werden völlig neue Begriffe, Abstraktionen und Vorstellungen wichtig. Die Relativitätstheorie war ein solcher Paradigmenwechsel. Somit erfinden wir immer wieder neue Realitätsbilder. Sie verdrängen die alten Ideen niemals völlig, sondern ersetzen sie großteils durch Konzepte, die besser funktionieren und die Natur besser beschreiben. Oft sind sie so unvertraut, dass sie die Frage aufwerfen, was »Realität« überhaupt bedeutet. Dann kommt die nächste Umwälzung und wirft alles über den Haufen. Und wir sind jedes Mal wieder überrascht, dass das alte Denken auf den gewohnten Bahnen einfach versagt.

Gibt es bei diesem fortwährenden Modellwechsel überhaupt Platz für so etwas wie objektive Realität?

Susskind: Jeder Physiker muss irgendwie voraussetzen, dass es in der Welt objektive Dinge gibt und dass es unsere Aufgabe ist, etwas darüber herauszufinden. Ich glaube nicht, dass man ohne dieses Gespür für eine objektive Realität Forschung treiben könnte. Das Indiz für Objektivität ist die Reproduzierbarkeit der Experimente. Wenn man gegen einen Stein tritt, schmerzt die Zehe. Wenn man zweimal tritt, schmerzt sie zweimal. Die Wiederholung desselben Experiments führt zu demselben Effekt. Allerdings sprechen Physiker fast nie von Realität. Der Begriff hat mehr mit Biologie und Evolution zu tun als mit Physik, er betrifft eher unsere biologische Hardware. Wie sind Gefangene unserer neuronalen Architektur. Manche Dinge können wir uns anschaulich vorstellen, andere nicht. Einsteins abstrakte, vierdimensionale Geometrie ließ sich nur schwer veranschaulichen. Vorstellbar wurde sie durch mathematische Beziehungen. Als die Relativitätstheorie plötzlich auf der Bildfläche erschien, müssen sich viele gefragt haben: Was ist mit der »wirklichen« Zeit geschehen? Was wurde aus dem »wirklichen« Raum? Beide sind irgendwie zu dieser komischen Raumzeit vermischt worden, aber es gibt Regeln – klare und präzise mathematische Regeln, die sich aus der Raumzeit abstrahieren lassen. Sie überdauern, während die alten Realitätsbegriffe verblassen. Darum sage ich: Trennen wir uns von dem Wort »Realität«. In unserer ganzen Diskussion wollen wir ohne diesen Begriff auskommen. Er stört. Er beschwört Dinge herauf, die uns kaum helfen. Das Wort »reproduzierbar« ist nützlicher als »real«.



ALFRED T. KAMAJIAN

Die Stringtheorie, an der Susskind mitwirkte, betrachtet die makroskopisch glatte Raumzeit als unruhigen »Quantenschaum«.

Was ist mit der Quantenmechanik? Gemäß dieser Theorie kann der Tritt gegen denselben Stein tatsächlich unterschiedliche Resultate ergeben.

Susskind: Das ist eben die große Frage. In der Quantenmechanik gibt es zwei Entdeckungen, die unseren klassischen Realitätssinn durcheinanderbringen. Erstens die Verschränkung. Sie besagt etwas sehr Bizarres: Man kann alles über ein zusammengesetztes System wissen, ohne alles über die einzelnen Bestandteile zu wissen. Für solche Abstraktionen sind wir biologisch einfach nicht ausgerüstet; sie unterminieren unseren Sinn für die Wirklichkeit. Die zweite Entdeckung, die den klassischen Realitätsbegriff erschütterte, war das heisenbergsche Unbestimmtheitsprinzip. Wenn man versucht, ein Objekt als etwas zu beschreiben, das sowohl einen Ort als auch einen Impuls hat, dann kommt man in Schwierigkeiten. Man muss sich vorstellen, dass es entweder einen eindeutigen Ort oder einen definierten Impuls besitzt, nicht beides zugleich.

Das meinen Physiker mit »Komplementarität«?

Susskind: Genau. Wie sich herausstellt, ähnelt die Mathematik des Ereignishorizonts eines Schwarzen Lochs dem Unbestimmtheitsprinzip. Wieder geht es um »oder« versus »und«. Ganz klassisch betrachtet fällt etwas entweder in ein Schwarzes Loch, oder es fällt nicht hinein. Es gibt Dinge au-

ßerhalb des Schwarzen Lochs, und es gibt Objekte innerhalb. Doch wie wir heute wissen, darf man nicht so denken. Man sollte sich nicht vorstellen, dass manche Dinge außerhalb des Horizonts geschehen und manche drinnen. Das sind redundante Beschreibungen derselben Sache. Das heißt, wir müssen die alte Idee aufgeben, ein Bit Information nehme einen eindeutig bestimmten Ort ein (siehe »Das Informationsparadoxon bei Schwarzen Löchern« von Leonard Susskind, Spektrum der Wissenschaft 6/1997, S. 58).

Wenn ich Sie recht verstehe, erweitert das holografische Prinzip das Komplementaritätsmodell für Schwarze Löcher auf das ganze Universum.

Susskind: Angenommen, wir möchten irgendein System höchst präzise beschreiben. Um es mit großer Genauigkeit zu messen, brauchen wir hohe Energien. Wenn man die Präzision immer mehr steigert, erzeugt man schließlich Schwarze Löcher. Die gesamte in einem Schwarzen Loch enthaltene Information befindet sich auf seiner Oberfläche, dem Ereignishorizont. Wenn man immer feinere Beschreibungen des Systems anfertigt, platziert man die Information am Ende auf einer Grenzfläche. Es gibt zwei Beschreibungen der Realität: Entweder ist die Realität das Raumzeitvolumen innerhalb der Grenzfläche, oder die Realität ist die Fläche selbst. Welche Beschreibung ist nun real? Darauf gibt es keine Antwort. Wir können uns ein Objekt entweder als ein Ding innerhalb des Volumens vorstellen oder als eine kompliziert verschlüsselte Information auf der Grenzfläche, die es umgibt. Beides zugleich geht nicht. Entweder oder. Es handelt sich um eine unglaublich verworrene Abbildung des einen auf das andere.

Das ursprüngliche Ziel der Stringtheorie war eine eindeutige Erklärung der Realität. Jetzt liefert sie uns multiple Universen. Was ist passiert?

Susskind: Viele Physiker haben den Versuch aufgegeben, unsere Welt als eindeutig zu erklären, als die einzige mathematisch mögliche Welt. Derzeit wird das Multiversum favorisiert. Nicht jeder arbeitet daran, aber es gibt kein schlüssiges, starkes Gegenargument.

Warum?

Susskind: Das Universum ist sehr, sehr groß. Empirisch wissen wir, dass sein Volumen mindestens 1000-mal größer ist als der für uns jemals sichtbare Teil. Der Erfolg des Modells der kosmischen Inflation eröffnet die Möglichkeit, dass das Universum in genügend großem Maßstab unterschiedlich beschaffen ist. Die Stringtheorie liefert quasi Legosteine, die sich auf enorm viele Arten zusammensetzen lassen. Darum hat es keinen Sinn, nach Erklärungen dafür zu suchen, warum unser Stückchen Welt gerade so und nicht anders beschaffen ist, denn es gibt andere Weltstücke, die nicht genau so sind wie unseres. Es kann keine universelle Erklärung für alles geben, die mehr wert ist als die Behauptung, es gebe ein Theorem, wonach die mittlere Temperatur eines Planeten 15 Grad Celsius beträgt. Jeder, der versucht, rechnerisch zu beweisen, dass Planeten 15 Grad warm sind, ist ein Narr, denn es gibt unzählige Planeten im All, die nicht diese Temperatur haben.

Doch niemand kennt die Grundregeln für Multiversen. Der Vorgang der ewigen Inflation erzeugt einfach eine Blase nach der anderen – unter anderem auch zahllose gleichartige Blasen mit beliebigen Eigenschaften. Die Wahrscheinlichkeit der einen Art gegenüber der anderen ist unendlich durch unendlich. Wir besäßen gern eine Häufigkeitsverteilung, die besagt, dass eine Blase wahrscheinlicher ist als die andere; dann könnten wir Vorhersagen machen. So sind wir von einem sehr überzeugend anmutenden Bild zu dem absurden Versuch verführt worden, eine Unendlichkeit von Wahrscheinlichkeiten zu messen. Wenn das Inflationsmodell scheitern sollte, dann aus diesem Grund (siehe »Kosmische Inflation auf dem Prüfstand« von Paul J. Steinhardt, Spektrum der Wissenschaft 8/2011, S. 40).

Ist es möglich, theoretische Physik zu betreiben, ohne auf philosophische Ideen zu kommen?

Susskind: Die meisten großen Physiker hatten einen recht ausgeprägten Hang zu philosophischen Überlegungen. Mein Freund Richard Feynman (1918–1988) hasste die Philosophie und ihre Vertreter, aber ich kannte ihn gut und weiß, dass er zu tiefen Überlegungen allgemeinster Art neigte. Die Auswahl der Probleme, über die man nachdenkt, wird durch eine philosophische Grundeinstellung bedingt. Andererseits möchte ich betonen: Es gibt immer wieder Überraschungen, welche die philosophischen Vorurteile auf den Kopf stellen. Die gängige Meinung besagt, für Wissenschaft gebe es Standardregeln: Man macht Experimente, bekommt Ergebnisse, interpretiert sie und hat am Ende Erkenntnis gewonnen. Doch der wirkliche Wissenschaftsprozess ist so chaotisch und widersprüchlich wie alles, was Menschen machen.

DER AUTOR

Peter Byrne ist Journalist in Nordkalifornien und Verfasser des Artikels »Die Parallelwelten des Hugh Everett« in Spektrum der Wissenschaft 4/2008, S. 24. Daraus ist sein aktuelles Buch »Viele Welten – ein Familiendrama zwischen Kaltem Krieg und Quantenphysik: Das faszinierende Leben des Hugh Everett III« (Springer, Heidelberg 2012) hervorgegangen.

QUELLEN

Feyerabend, P.: Irrwege der Vernunft. Suhrkamp, Frankfurt 1990
Susskind, L.: Der Krieg um das Schwarze Loch. Wie ich mit Stephen Hawking um die Rettung der Quantenmechanik rang. Suhrkamp, Frankfurt 2010
Susskind, L.: The Cosmic Landscape: String Theory and the Illusion of Intelligent Design. Back Bay Books, New York 2006

WEBLINKS

www.scientificamerican.com/jul2011/susskind
Diskussion über das Wesen der physikalischen Realität (in englischer Sprache)

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1139703**

Lange Winter, lange Zapfen

Erst beim genauen Hinsehen zeigt sich,
dass selbst ein Eiszapfen noch Geheimnisse verbirgt.

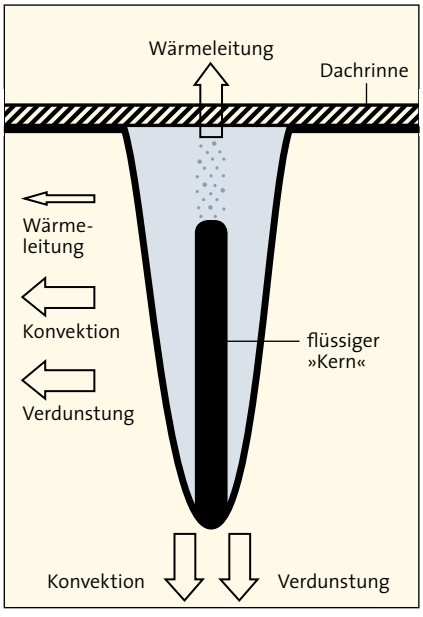
VON H. JOACHIM SCHLICHTING

An meiner Dachkante hängt
Eiszapfen neben Zapfen,
starr,
die fangen zu schmelzen an,
Tropfen auf Tropfen blitzt,
jeder dem andern unvergleichlich,
mir ins Herz.

Richard Dehmel (1863–1920)

»Es schneite, taute und fror wieder während des Monats Hornung (Februar) in so häufigem Wechsel, daß nicht nur viele Menschen krank wurden«, so schrieb einst Gottfried Keller (1819–1890), »sondern auch eine solche Menge Eiszapfen entstand, daß das ganze Land aussah wie ein großes Glasmagazin und jedermann ein kleines Brett auf dem Kopfe trug, um von den fallenden Spitzen nicht angestochen zu werden.«

Kein Wunder, dass die Worte des Dichters sogleich die Vorstellung eines besonders kalten Winters in uns entstehen lassen. Denn Eiszapfen wachsen offenbar dann am besten, wenn schnee- oder eisbedeckte Flächen zwar immer wieder von der Sonne erwärmt werden, sonst aber lange Zeit tiefen Temperaturen ausgesetzt sind. Das sorgt einerseits für Nachschub an flüssigem Schmelzwasser, andererseits kann dieses bald wieder gefrieren und sich an die Zapfen anlagern.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Zu den Seiten hin verliert ein an einer Dachrinne wachsender Eiszapfen seine Wärmeenergie vor allem durch Konvektion und Verdunstung. Wärmeleitung findet hingegen vor allem von unten nach oben statt.

Um die Entstehung von Eiszapfen zu beschreiben, genügen eigentlich wenige Worte. Doch schnell stellen sich weitere Fragen: Wieso nehmen sie kegelähnliche Form an, wachsen also schneller in die Länge als in die Breite? Und warum sind ihre Oberflächen nicht eben, sondern stellen vielmehr eine Aneinanderreihung horizontaler Wülste dar, die sich sogar an das metrische System zu halten scheinen?

Solange sie mit flüssigem Wasser versorgt werden, können sich Eiszapfen an allen überhängenden Objekten bilden: an Bäumen, Verkehrsschildern, Autokotflügeln, Stromleitungen. Ideal sind Dachkanten. Denn wenn die Sonne an frostigen Tagen den auf einem Dach liegenden Schnee teilweise schmilzt, kann das entstandene Wasser unter der Schneedecke zum Dachrand abfließen. Wegen der Kälte, die an der mit Schnee, Wasser und Eis überfüllten Dachrinne herrscht, gefriert es schließlich, noch ehe es hinuntertropfen kann. Selbst nach Sonnenuntergang setzt sich der Prozess noch eine Weile fort. Denn auch die aus dem geheizten Haus kommende Wärme hält das Wasser flüssig; zusätzlich isoliert der Schnee das Dach gegen die kalte Umgebungsluft.

Keimzelle eines Eiszapfens ist meist ein hängender Tropfen, den die Erstarrung kalt erwischt hat, bevor er sich ablösen konnte. Die Wassermoleküle schwingen allmählich langsamer und geben ihre Bewegungsenergie an die Umgebung ab. Zunächst erstarren die der kalten Luft ausgesetzten Wassermoleküle an der Oberfläche des Tropfens und kleiden ihn in eine Eishülle ein. Auf dieser bildet weiteres nachfließendes Wasser schnell eine flüssige Wasserhaut. Auch sie verliert im direkten Kontakt mit der Luft infolge von Wärmeleitung, Konvektion und Verdunstung schnell ihre Energie und gefriert.

Schon der nun entstandene Minieiszapfen tendiert dazu, an seinem oberen Ende in die Breite zu wachsen. Denn wenn wenig Wasser nachfließt, wird nur dieser Bereich benetzt. Läuft hingegen zu viel Wasser nach, gelangt es bis ans untere Ende des Zapfens und tropft dort entweder ab oder bleibt ebenfalls gefrierend hängen. All diese Prozesse wiederholen sich immer und immer wieder.

Der Kern bleibt lange flüssig

Selbst bei großer Kälte friert der flüssige Kern des Zapfens zunächst zwar von oben her zu, nicht aber von den Seiten. Denn dazu müsste die frei werdende Kristallisationswärme quer durch den Zapfen nach außen abgegeben werden. Das wiederum setzt einen Temperaturunterschied zwischen innen und außen voraus, den es aber nicht gibt. Denn solange der Zapfen gleichmäßig wächst, pendelt sich sowohl an der äußeren Grenzschicht zwischen Eis und Luft wie auch an der inneren zwischen Eis und Wasser eine Gleichgewichtstemperatur von null Grad Celsius ein. Ein subtiler Selbstorganisationsvorgang stabilisiert sie nämlich gegen äußere Störungen: Wäre die Temperatur niedriger, würde

FOTOS: H. J. SCHLICHTING

Jeder Zapfen ist ein Individuum – die »Bauprinzipien« sind jedoch bei allen dieselben. Am längsten werden die Objekte, wenn über einen größeren Zeitraum hinweg tiefe Temperaturen herrschen, sich aber immer wieder die Sonne zeigt.

Versiegt die Zufuhr von Wasser, gefriert auch das zuvor flüssige Wasser im Inneren des Zapfens. In kleinen Blasen sammelt sich dabei die darin gelöste Luft. Die große Blase ist wohl Folge eines Windstoßes, der Wasser aus dem Hohlraum absaugte.

zusätzliches Wasser gefrieren und dabei Wärme abgeben, wodurch die Temperatur wieder auf null Grad anstiege. Und wäre sie höher, würde Eis schmelzen und dafür Wärme benötigen, so dass die Temperatur auf null Grad sänke. Ein Wärmetransport ist also nur von der Wassersäule nach oben zur Zapfenwurzel möglich (siehe Grafik links) – lediglich dort, an der Dachtraufe, ist es kälter als null Grad.

Von der Existenz des inneren Flüssigkeitsfadens kann man sich übrigens leicht mit einem Draht oder Schaschlikstäbchen überzeugen. Wächst dieser »Hohlraum« von oben nach unten allmählich aber doch zu, hinterlässt er eine Spur von eingeschlossenen Luftblasen. Diese entstehen aus den Luftmolekülen, die zuvor im Wasser gelöst waren (siehe Foto oben rechts).

Während Experimente typischerweise unter gleich bleibenden Bedingungen stattfinden, ist die Natur unberechenbar. Mal begünstigt stärkerer Wind die Wärmeabfuhr, mal fließt plötzlich mehr Wasser über den wachsenden Zapfen. Besonders starken Windstößen gelingt es sogar, Wasser aus dessen Innerem herauszusaugen. Dort können dabei recht große Luftblasen entstehen. Man muss die individuelle Form eines Zapfens also nur richtig »lesen«: Große Blasen deuten auf eine stürmische Vergangenheit hin, eingeschnürte Stellen auf wärmere Perioden und so weiter. »Tot« ist ein Zapfen erst, wenn die Wasserzufuhr versiegt und auch sein Inneres zufriert.

Eine weitere Auffälligkeit wird oft übersehen: die wellenartige Oberfläche von Eiszapfen. Als würden sie sich nach dem metrischen System richten, beträgt die Länge der Wellen etwa einen Zentimeter. Diesem Phänomen liegt ein weiterer Selbstorganisationsprozess zu Grunde, bei dem zwei entgegengesetzte Tendenzen miteinander konkurrieren. Die eine wird als Laplace-Instabilität bezeichnet und verstärkt kleinste zufällige Dickeschwankungen des Zapfens. Denn je exponierter eine Stelle auf der Außenseite ist, beispielsweise ein Wellenberg gegenüber einem Wellental, desto besser wird die Wärme abgeleitet und desto schneller wächst die Eisschicht.

Die andere ist das Bestreben der Natur, Temperaturdifferenzen auszugleichen. Das über den wachsenden Zapfen fließende Wasser erwärmt demzufolge die »kalten« Wellenberge und kühlt die »wärmeren« Wellentäler. Dieser Effekt bremst das Eiswachstum und regelt es auf einen gleich bleibenden Wert ein. Er ist umso stärker, je mehr sich die Temperatur zwischen beiden unterscheidet.

Zur Beschreibung dieser Phänomene haben Wissenschaftler der japanischen Hokkaido-Universität eigens eine Theorie entwickelt. Sie erklärt nicht nur die beobachtete Wellenlänge, sondern zeigt darüber hinaus, wie sich die Wellenstruktur der Zapfen allmählich fortbewegt. Indem Wellenberge und -täler unten schmelzen und weiter oben in gleichem Maß gefrieren, wandern sie den Forschern zufolge halb so schnell nach oben, wie der Zapfen wächst. Diese Vorhersage harrt meines Wissens aber noch der Überprüfung.

Höhlenforscher haben für Erkenntnisse rund um Eiszapfen übrigens ebenfalls Verwendung. Zumindest erleichtern sie, weil ihr Wachstum universellen Prinzipien folgt, manches Experiment. Eiszapfen bilden sich nämlich auf ähnliche Weise wie Stalaktiten in Tropfsteinhöhlen – nur dass die einen binnen weniger Wochen eine beachtliche Länge erreichen, während die anderen dazu Jahrtausende benötigen.

DER AUTOR

H. Joachim Schlichting war bis 2011 Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. 2008 erhielt er für seine didaktischen Konzepte den Pohl-Preis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.

QUELLE

Ogawa, N., Furukawa, Y.: Surface Instability of Icicles. In: Physical Review E 66, 041202, Oktober 2002

LITERATURTIPP

Schlichting, H.J.: Eiszapfen, die gen Himmel wachsen. In: Spektrum der Wissenschaft 3/2011, S. 38–39

Cherokee als Sklavenhalter

Um sich den Weißen anzupassen und ihre wirtschaftliche Lage zu verbessern, erwarben Indianer der Cherokee-Nation afrikanische Sklaven: ein wenig beachtetes Kapitel der nordamerikanischen Geschichte.

Von Julian Willuhn

Aus Afrika entführte Sklaven und ihre Nachkommen galten weißen Plantagenbesitzern als minderwertig. Diesen Rassismus übernahmen Indianerstämme im Gebiet der Südstaaten, darunter die Cherokee (im Bild: ehemalige Sklaven der Cherokee um 1900).

Weiß, Schwarz und Rot – drei Hautfarben, mit denen sich eindringliche Bilder zur Geschichte der USA, insbesondere der Südstaaten, verbinden: weiße Großgrundbesitzer, deren aristokratischer Lebensstil auf der Arbeit afrikanischer Sklaven gründet; weitläufige Plantagen auf einem Land, das Indianern geraubt wurde. Mögen diese Vorstellungen von Opfern und Tätern auch in vielem der Wahrheit entsprechen, liefern sie nach heutiger Kenntnis doch kein vollständiges Geschichtsbild. Denn mit Ausnahme der Seminolen übernahmen die großen Indianerstämme des Südostens – die Creek, Choctaw, Chickasaw, vor allem aber die Cherokee – auch manche Aspekte europäischer Kultur, bis hin zu Rassismus und Sklaverei. Erst seit den 1970er Jahren untersuchen Forscher die Lebensumstände schwarzer Sklaven in den Indianernationen.

Vor der Ankunft der Weißen lebten die Stämme dort vom Jagen, Sammeln und Gartenbau. Doch mit den Europäern setzte der Niedergang ihrer Kultur ein. Der im 17. Jahrhundert beginnende Pelzhandel mit den englischen Kolonien in Virginia hatte einen massiven Rückgang der Wildbestände zur Folge – für einige der Völker ging eine wichtige Lebensgrundlage verloren. Eingeschleppte Infektionskrankheiten erreichten von Virginia aus über Zwischenstationen auch die Cherokee und dezimierten ihre Zahl.

Die Briten, die sich der indianischen Krieger seit 1730 als Verbündete gegen die französischen Kolonien bedient hatten, boten Unterstützung an – sofern die Cherokee den christlichen Glauben annahmen und Ackerbau betrieben. Doch Gartenarbeit galt als Frauensache, Männer erlangten Ruhm und Ehre im Krieg und bei der Jagd. Zudem fehlte es den Stämmen an Gerätschaften und Saatgut sowie am nötigen Wissen, um große Getreidefelder zu bestellen oder gar Baumwolle und Tabak anzubauen. Doch der »einzige Weg, dem Hungertod zu entgehen, war, die Lebensweise des weißen Mannes zu übernehmen«, wie der amerikanische Historiker William McLoughlin von der Brown University in Providence konstatierte.

OKLAHOMA HISTORICAL SOCIETY, RESEARCH DIVISION, PHOTO 15805

Nach der Unabhängigkeitserklärung von 1776 setzte die junge US-Regierung die Integrationspolitik fort. Während ihre Agenten versuchten, die Indianer in die Geheimnisse von Ackerbau und Viehzucht einzuweihen, lösten manche Stammesangehörige ihr Problem auf ungewöhnliche Weise. Oft handelte es sich dabei um Söhne weißer Händler, die Cherokeefrauen geheiratet hatten. Dank ihrer Englischkenntnisse, des ererbten Vermögens und der guten Kontakte konnten sie Schwarzafrikaner kaufen.

Bis dahin diente die Versklavung von Kriegsgefangenen eher dem Renommee der Krieger. Nun aber vermochte eine kleine Gruppe Gewinne zu erwirtschaften, ohne selbst die Hacke schwingen zu müssen. Nicht anders als bei den Weißen lebten Sklaven im Haus ihres Herrn oder in separaten Quartieren, bestellten die Felder, hüteten das Vieh, führten den Haushalt und gingen handwerklichen Tätigkeiten nach. 1809 bezifferte eine Steuererhebung die Zahl der Cherokee auf 12395, die ihrer Unfreien auf 584, 1828 kamen auf 14 972 Indianer immerhin schon 1038 Schwarze. Freilich war das um Größenordnungen kleiner als auf den Plantagen der Weißen: In den Vereinigten Staaten lebten zu dieser Zeit über zwei Millionen Sklaven. Anfangs hatten die Europäer auch Indianer auf

AUF EINEN BLICK

ÜBERLEBENSSTRATEGIE RASSISMUS

1 Sklaverei und Rassismus fanden sich nicht nur bei der weißen Bevölkerung Nordamerikas: **Um sich anzupassen**, erwarben **auch indianische Nationen** schwarze Sklaven.

2 Im Zuge dessen übernahmen insbesondere die Cherokee den Rassismus der Europäer und betrachteten geraubte Afrikaner als **minderwertig und weit gehend rechtlos**.

3 Diese Anpassung verfolgten die Cherokee noch nach ihrer **Deportation nach Oklahoma**. In der Folge spaltete die Sklavenhaltung ihre Nation, weshalb **im amerikanischen Bürgerkrieg** auch Cherokee gegen Cherokee kämpfte.

ihre Felder gezwungen. Doch ihre Anfälligkeit für Infektionskrankheiten und die häufigen Fluchtversuche in die nahen Dörfer ließen den Sklavenhandel mit Afrikanern boomen.

Vor der Ankunft der Weißen hatten die Cherokee Fremden meist misstrauisch gegenübergestanden – durch Adoption konnte aber jeder zu einem vollwertigen Mitglied des Stamms werden. Allmählich übernahmen sie dann jedoch europäische Vorstellungen von Rasse und Hautfarbe. So schränkte auch die Cherokee-Nation die Rechte der verschleppten Afrikaner massiv ein. Sklaven durften weder Vieh besitzen noch Handel treiben; einem Freigelassenen war es untersagt, Indianerland zu betreten. 1824 verbot der oberste Rat zudem die Mischehe. Dem war das Gesuch des renommierten Kriegers Shoeboots vorausgegangen, seine Kinder aus der Verbindung mit einer Sklavin mit vollen Bürgerrechten auszustatten. Der Rat gewährte dies zwar, bezeichnete die Liaison aber als entwürdigend und wollte Derartiges künftig unterbinden. Die amerikanische Historikerin Fair Yarbrough von der University of Oklahoma in Norman verglich diesen Vorgang mit Verboten von Mischehen in den weißen Kolonien. Während dort auch die Ehe mit Indianern untersagt war, erlaubten die Cherokee Verbindungen zu Weißen. Die Forscherin sieht darin eine demonstrative Gleichstellung mit den Eroberern. Die Schwarzen hingegen galten per se als minderwertig, was ihre Versklavung rechtfertigte. Lediglich ihre grundlose Tötung zählte immer noch als Mord.

Weiße warfen den Cherokee dennoch vor, die Afrikaner zu nachsichtig zu behandeln. Der Historiker Rudi Halliburton jr. von der Northeastern Oklahoma State University in Tahlequah veröffentlichte 1977 indes von ihm gesammelte Erfahrungsberichte Freigelassener. Deren Aussagen zeichnen ein differenziertes Bild vom Leben der Sklaven unter den Cherokee. Einige lobten, dass »der Master niemals jemanden bestrafte« und wünschten sich gar, »die Sklaverei wäre niemals vorbeigegangen«. Andere schilderten rohe Gewaltanwendung wie das Auspeitschen Kranker, die ihrer Arbeit nicht nachkamen. Der Umgang mit dem menschlichen Produktionsmittel variierte offenbar von Besitzer zu Besitzer. Plantagen wie bei den Weißen, auf denen ein Sklave selten länger als zwei Jahre überlebte, gab es in der Cherokee-Nation aber tatsächlich nicht.

Zudem lehnten etliche Indianer die Sklaverei ab. Allerdings nicht aus humanitären Gründen, sondern weil sie in der Anpassung an die Weißen einen Verrat an der traditionellen Lebensweise sahen. Für jene, die sich hatten verschleppen lassen, hegten diese Verfechter des althergebrachten Kriegertums wenig Mitleid – nur der Starke verdiente Freiheit.

In einem Punkt gab die Geschichte ihnen Recht: Die Hoffnung, durch eine Transformation der Stammesgesellschaft

Seminolen, Creek, Chickasaw, Choctaw und Cherokee bildeten die »fünf zivilisierten Nationen« im Südosten Nordamerikas. In den 1830er Jahren wurden sie aus ihren bereits geschrumpften Stammesgebieten nach Oklahoma deportiert (»Pfade der Tränen«).

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK

CORBIS IMAGES

Die Cherokee gehörten zu den mächtigsten Stämmen des Südostens (Bild des Häuptlings Austenaco von 1762, eines im Volk hoch geachteten Kriegers). Vor dem Unabhängigkeitskrieg waren sie Verbündete der Briten und mussten nun in der neuen Welt der Südstaaten ihren Platz finden. Nicht wenige suchten ihr Heil in der Anpassung an die Lebensweisen der Weißen.

nach dem Vorbild der Eroberer die Anerkennung der Indianerterritorien als souveräne Staaten zu erreichen, wurde bitter enttäuscht. Immer wieder brachen die USA Verträge, in denen sie den Eingeborenen Kontrolle über ihr Land zugesichert hatten. Im Staat Georgia veranlasste der 1829 einsetzende Goldrausch die Regierung dazu, den Indianern die Schürfrechte in ihren Siedlungsgebieten zu entziehen. Klagen vor dem Obersten Gerichtshof der USA hatten zwar Erfolg, doch Präsident Andrew Jackson setzte sich 1830 über diese Entscheidung hinweg und unterzeichnete den Indian Removal Act, der die Umsiedlung der östlich des Mississippi lebenden Stämme anordnete. Auf dem »Pfad der Tränen« in das gut 2000 Kilometer entfernte Indianerterritorium in Oklahoma starben nach neueren Forschungen etwa 8000 der deportierten 13 000 Cherokee – viele andere hatten ihr Land vorher schon freiwillig verlassen.

Der neue Lebensraum bot schlechtere Lebensbedingungen, doch nach bürgerkriegsähnlichen Auseinandersetzungen entstand ein europäisch anmutendes Gemeinwesen mit Kirchen, Zeitungen und einem Parlament in der neuen Hauptstadt Tahlequah. Es fällt aber auf, dass sich die Situation der Sklaven verschlechterte. Ihnen wurde es beispielsweise untersagt, lesen und schreiben zu lernen, auch durften sie keine Waffen mehr tragen. Neue Erlasse erklärten Freigelassene und »Mischlinge« für unwürdig, ein Amt zu bekleiden, die Strafen für Mischehen wurden verschärft und schließlich alle freien Schwarzen ausgewiesen. Offenbar verfolgte die herrschende Schicht der Cherokee weiterhin die längst gescheiterte Strategie der Abgrenzung, für Yarbrough ein Beispiel dafür, »wie sich eine Gruppe gegen eine rassische Einordnung und die Unsicherheit ihrer eigenen Position wehrt, indem sie eine andere Gruppe rassisch einstuft«.

Das Gesamtbild der Nation erweist sich im Licht der Forschung allerdings als weit differenzierter. Denn nur wenige profitierten von der Sklavenhaltung. Viele ärmere Cherokee litten Jahre nach der Vertreibung noch bittere Not. Sie wehrten sich gegen den Einfluss der Amerikaner und forderten die Abschaffung der Sklaverei. Geheimbünde von Gegnern und Befürwortern kämpften gegeneinander. Als sich der amerikanische Bürgerkrieg 1861 an der Sklavenfrage entzündete, standen Cherokee in der Schlacht anderen Cherokee gegenüber. Am 18. Februar 1863 proklamierte der unionstreue Teil der Nation das Ende der Sklaverei, doch erst das Ende des Sezessionskriegs 1865 brachte den Schwarzen im Reservat tatsächlich die Freiheit.

Von vollkommener Gleichberechtigung konnte allerdings keine Rede sein. Beispielsweise waren die Schulen auch in der Cherokee-Nation nach Hautfarbe getrennt, farbige Kinder wurden in Waisenhäusern nicht aufgenommen. Dabei waren die ehemaligen Sklaven mittlerweile kulturell mit den Indianern verbunden, sprachen ihre Sprache und pflegten die gleichen Bräuche.

Als Theodore Roosevelt 1906 die unabhängigen Indianerterritorien Oklahomas mit einem Federstrich den USA anschloss, verloren diese zwar ihre Unabhängigkeit, erhielten aber endlich die gleichen Rechte wie die Weißen. Die Situation der Abkömmlinge ihrer Sklaven verbesserte sich dabei nicht. 1983 schloss der Oberste Gerichtshof der Cherokee sie offiziell aus der Nation aus, im vergangenen September bestätigte er das Urteil. Für die Betroffenen geht es um die Anerkennung ihres kulturellen Erbes wie auch um handfeste Fragen etwa der Krankenversicherung. Die Indianer betonen zwar heute, dass ein einziger auf Klanlisten verzeichneter indianischer Vorfahr zur Aufnahme in die Nation genüge, die Betroffenen aber fordern, die kulturelle Zugehörigkeit zur Welt der Indianer sollte entscheidend sein. Obwohl der offene Rassismus der Cherokee vielfach kritisiert wird, mischen sich die Behörden der Vereinigten Staaten bisher nicht in die internen Angelegenheiten des Stamms ein.

DER AUTOR

Julian Willuhn ist Historiker und arbeitet als freier Wissenschaftsjournalist in Hamburg.

QUELLEN

Katz, W. L.: Black Indians. A Hidden Heritage. Atheneum Books for Young Readers, New York 1986

Yarbrough, F. A.: Race and the Cherokee Nation. Sovereignty in the Nineteenth Century. University of Pennsylvania Press, Philadelphia 2008

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1139705**

INTERVIEW

»Mehr als nur Büffel jagende Nomaden«

Der Historiker **Gilles Harvard**, Mitarbeiter der französischen Forschungseinrichtung MASCIPO (Mondes Américains. Sociétés, Circulations, Pouvoirs) erzählt von den Eigenheiten nordamerikanischer Indianer und ihrer wechselvollen Geschichte.

Spektrum der Wissenschaft: *Mit dem Begriff Indianer verbindet sich die Vorstellung von Büffel jagenden Reiternomaden. Wird sie der geschichtlichen Wirklichkeit gerecht?*

Gilles Harvard: Absolut nicht. Europäische Kolonialisten beschrieben die indigenen Völker im 17. Jahrhundert zwar oft als streunende Wilde, doch viele Gruppen waren sesshaft und betrieben Ackerbau. Zu ihnen zählten etwa die Huronen und Irokesen im Gebiet der Großen Seen. Sie pflanzten Mais und Kürbis an, jagten, fischten und sammelten aber auch, was die Natur an Essbarem hergab. Die gesellschaftlichen Strukturen waren ebenfalls vielfältig: Es gab sowohl egalitär als auch streng hierarchisch organisierte Gruppen.

Wie lässt sich diese Heterogenität aus Sicht der Forschung systematisch fassen?

Harvard: Amerikanische Anthropologen teilen Nordamerika in zehn Kulturareale, beispielsweise die Großen Ebenen mit den Prärien, das nordöstliche und das südöstliche Waldland oder die Subarktis. Dort lebten Indianer mit gemeinsamen kulturellen Merkmalen, in denen sich die Nutzung der jeweiligen Ressourcen niederschlug. In den Laub- und Mischwäldern des Nordostens etwa errichteten die Menschen Langhäuser und Wigwams, jagten und bauten Feldfrüchte an. In den Großen Ebenen lebten im 19. Jahrhundert Reiternomaden, die in Zelten wohnten und ihre Habe auf dem Travois – einer Art Schlitten – transportierten; ihre wichtigste Lebensgrundlage war die Bisonjagd. Diese Lebensweise beruhte aber auf der Verfügbarkeit von Pferden, und die gelangten erst mit den Europäern nach Nordamerika. Vor dem 17. Jahrhundert hingegen waren die Cheyenne, die wir als typische Prärieindianer kennen, sesshafte Ackerbauern, die in Lehmhütten wohnten. Die Umweltbedingungen ließen also durchaus einen gewissen Spielraum und diktierten nicht die Überlebensstrategien. Das zeigt auch dieses Beispiel: Indianer im fruchtbaren Kalifornien lebten als Jäger und Sammler, während im eigentlich dürren Südwesten Mais kultiviert wurde.

Helfen denn die jeweiligen Sprachen bei der Systematisierung?

Harvard: In Nordamerika gab es hunderte Sprachen, als die Europäer eintrafen. Forscher teilen sie in Familien ein wie Algonkin, Irokesisch oder Sioux, aber die lassen sich nicht unbedingt mit den Kulturarealen in Deckung bringen. Inzwischen drohen übrigens viele dieser Sprachen auszusterben. Im Reservat der Sioux-Lakotas in Pine Ridge (in South Dakota) beherrschten 1965 noch drei Viertel der Stammesmitglieder Lakota, heute sprechen es nur noch zehn Prozent fließend.

Lassen sich überhaupt Gemeinsamkeiten zwischen den verschiedenen Stämmen Nordamerikas finden?

Harvard: Drei Konstanten sind schon erkennbar. Erstens glaubten die Indianer an eine enge spirituelle Verbindung von Mensch und Lebensumwelt. In dieser animistischen Vorstellungswelt galten für Tiere und Pflanzen dieselben Regeln der sozialen Organisation wie für die menschlichen Gemeinschaften. Die zweite Gemeinsamkeit: Das Züchten von Tieren im Sinn der Selektion kam für Indianer nicht in Frage. Sie hielten durchaus Haustiere: gezähmte Biber und Bären. Hunde zogen die Travois, Pferde spielten in den Prärien eine große Rolle. Aber diese Tiere galten eher als Teil der Familie. Schließlich das dritte Merkmal: Indianer waren meist kriegerisch, überfielen andere Gruppen, versklavten Gefangene, adoptierten sie aber auch gelegentlich. Ob Feind oder nicht – diese Einordnung war stets fließend. Man schloss ein Bündnis, und es bildeten sich Konföderationen, aber binnen kurzer Zeit herrschte wieder Krieg. Diese labilen Verhältnisse wussten sich Franzosen, Engländer und später Amerikaner im Kampf gegeneinander und gegen indianische Stämme zu Nutze zu machen.

Müssten sich bei den Stämmen, die im Übergangsgebiet zu Mittelamerika siedelten, nicht auch Ähnlichkeiten mit den Kulturen der benachbarten präkolumbischen Indianer finden?

AKG IMAGES / NORTH WIND PICTURE ARCHIVES

CORBIS IMAGES / EDWARD S. CURTIS

Die Indianer Nordamerikas verstanden es, die Ressourcen ihrer Umgebung optimal zu nutzen. So lebten die auch Feldbau treibenden Stämme der Waldländer in festen Siedlungen (links: Langhausdorf auf der Insel Manhattan), während Prärieebewohner mit der Verfügbarkeit von Pferden – ein Import der Europäer – eine nomadische Lebensweise aufnahmen (Foto rechts).

Harvard: Die gab es durchaus. Im 12. Jahrhundert erinnerte manches im Mississippital und im Südosten der Vereinigten Staaten an die Azteken und Mayas. In der Nähe des heutigen St. Louis erstreckte sich auf einer Fläche von zehn Quadratkilometern Cahokia, eine Art Stadtstaat. Dort lebten 25 000 Einwohner – mehr als im London jener Zeit. Wie in Mittelamerika baute man monumentale, gelegentlich pyramidenförmige Hügel mit einer Plattform auf ihrer Kuppe. Mehr als 120 solcher Tumuli wurden nachgewiesen, darunter etliche Grabmäler. Zudem war die Gesellschaft sehr hierarchisch organisiert, man pflanzte Mais an und praktizierte den Sonnenkult. Wie in den südlicheren Gefilden kannte ihre Mythologie Vogelmenschen und Federschlangen.

Diese Mississippizivilisation ging ab dem 14. Jahrhundert unter, hinterließ aber Spuren: Als sich die Franzosen um 1700 am großen Strom ansiedelten, stießen sie auf die Natchez. An deren Spitze regierte eine »Große Sonne«, die sich auf die Klasse der »Sonnen« stützte. Diesen wiederum waren drei weitere Gesellschaftsschichten untergeordnet. Der Häuptling durfte nie den Boden berühren und wurde deshalb auf einer Liege getragen. Starb eine »Große Sonne«, erdrosselte man hunderte Angehörige als Opfergabe.

Wie gelingt es, diese Geschichte zu erforschen?

Harvard: Um die Besiedlung Amerikas nachzuzeichnen, die womöglich schon vor einigen zehntausend Jahren begonnen hat, ist die Archäologie sehr wichtig. Anhand von Grabfunden – Beigaben wie auch Skelettresten – lassen sich Rückschlüsse auf Ernährung und Krankheiten ziehen, aber auch auf die Trauerrituale. Siedlungen und Lagerplätze geben anhand von Fundamenten, Tonscherben und anderen Artefakten Aufschluss über den Alltag jener Menschen. Die mündlichen Überlieferungen der heute lebenden Indianer bergen ebenfalls manche Information. Eine ganz wichtige Quelle sind natürlich die Aufzeichnungen amerikanischer Anthropologen und Ethnologen aus der Zeit zwischen 1880 und 1940. Sie konnten Indianer befragen, die traditionelle Lebensweisen noch aus eigener Anschauung kannten. Schließlich darf man auch die Schriften der Kolonisten nicht vergessen, die als Missionare, Beamte, Entdecker oder Händler kamen. Freilich sind diese Texte oft aus einer bestimmten Perspektive geschrieben, müssen also kritisch gelesen werden.

Wann erfolgten die ersten Kontakte mit Europäern?

Harvard: Das dürfte schon Ende des 15. Jahrhunderts gewesen sein, als Kabeljaufischer ihre Beute im Sankt-Lorenz-Golf jagten und den Fisch an Land trockneten. Anfang des 17. Jahrhundert entstanden die ersten Kolonien von Franzosen, Briten und Spaniern. Wo immer der Tauschhandel lohnte oder die Neuankömmlinge ohne militärische Allianzen mit indianischen Gruppen nicht überleben konnten, entwickelte sich ein Miteinander. Gab es Probleme, eskalierten sie mitunter jedoch zu bewaffneten Auseinandersetzungen. Als die Engländer in Virginia den Anbau von Tabak ausweiteten, gerieten sie in Streit mit den Powhatans. In Neuengland bekämpfen britische Puritaner die Pequots und Wampanoags. Die Franzosen waren genauso wenig Unschuldslämmer: Im Mississippital verbündeten sie sich mit den Natchez, vernichteten den Stamm aber 1730 gemeinsam mit den Choctaw; auch dabei ging es um Landbesitz. Im Übrigen starben viele Indianer nicht durch Waffengewalt, sondern infolge von Infektionen: Von den Spaniern eingeschleppte Bakterien und Viren töteten im Südosten vermutlich 80 Prozent der indigenen Bevölkerung.

Was hat sich mit der Gründung der Vereinigten Staaten geändert?

CORBIS IMAGES / EDWARD S. CURTIS

Im heutigen New Mexico verstanden es indianische Stämme, trotz der Trockenheit ein vor allem auf Ackerbau basierendes Wirtschaftssystem aufzubauen. Wie hier in Acoma (Foto von 1926) errichteten sie Pueblos aus Lehmziegeln. Zur Bewässerung wurde Regen in Zisternen aufgefangen.

Harvard: Bereits 1763 hatte Großbritannien gegen Frankreich gesiegt, 1776 erklärten die britischen Kolonien ihre Unabhängigkeit vom Mutterland. Im nun folgenden Krieg kämpften manche Irokesen auf Englands Seite – und George Washington ließ mehrere Indianerdörfer zerstören. 1783 wurde der Unabhängigkeitskrieg offiziell beendet. Die Regierung der jungen Vereinigten Staaten schloss in der Folgezeit nicht weniger als 370 Abkommen mit indianischen Stämmen – die immerhin noch als souveräne Nationen galten. Meist ging es dabei um die Abtretung von Land.

Um 1830 versuchte man das »Indianerproblem« östlich des Mississippi endgültig zu lösen: Etwa 100 000 Cherokee, Choctaw und andere mussten ihre Heimat verlassen und in das Indianerterritorium in Oklahoma umsiedeln (siehe den vorigen Beitrag). Ab 1840 drangen Siedler auch dorthin vor, Indianeraufstände von Minnesota bis nach Kalifornien waren die Folge, blieben aber ein letztes Aufbäumen. Als 1876 die Sioux und Cheyenne den legendären Sieg am Little Big Horn errangen, war der Krieg längst verloren. In Reservate gedrängt, wurden sie einem Assimilierungsprogramm unterzogen, um ihre Kultur auszulöschen. Erst 1930 wurde das in Frage gestellt.

Wie ist die Situation heute?

Harvard: Um 1900 gab es in den Vereinigten Staaten nur noch etwa 250 000 Indianer, heute sind es mehr als vier Millionen; dazu kommt etwa eine Million in Kanada. Freilich haben sie sich verändert. Durch Mischehen findet man auch blonde Indianer mit blauen Augen oder wieder andere vom afroamerikanischen Typ.

In den 1960er und 1970er Jahren kämpfte die militante Red-Power-Bewegung für mehr Rechte. Indianische Kultur blühte wieder auf. So sind die Powwow genannten traditionellen Treffen nun wieder verbreitet. Und auch wenn das für manchen einen Beigeschmack haben mag: Die Eröffnung von Spielkasinos in einigen Reservaten hat die wirtschaftliche Lage dort verbessert. So finanzieren beispielsweise die Mashantucket-Pequot in Connecticut mit einem der modernsten Kasinos der USA unter anderem Kulturprojekte und ein Museum ihrer Stammesgeschichte. ~

Das Interview führte **Loïc Mangin**, stellvertretender Chefredakteur von »Pour la Science«.

RAUMFÜLLUNGEN

Verstecke der Bilunabirotunda

Ein einfaches, aber keineswegs triviales Polyeder erweist sich an manchen Stellen als charmanter Lückenbüßer.

VON NORBERT TREITZ

NORBERT TREITZ

Es gibt erstaunlich viele Möglichkeiten, den Raum lückenlos mit mehr oder weniger regelmäßigen Körpern zu füllen. Die einfachste ist das Mauerwerk aus lauter gleichen Würfeln. Etwas weniger regelmäßige Körper wie der Oktaederstumpf oder das aus dem Würfel herzuleitende Rhombendodekaeder sind ebenfalls raumfüllende Einzelbausteine. Wer zwei verschiedene Sorten »Ziegel« zu verwenden bereit ist, kann aus einer unüberschaubaren Anzahl von Möglichkeiten wählen, darunter Tetraeder und Oktaeder gleicher Kantenlänge (wobei auf jedes Oktaeder zwei Tetraeder kommen), Oktaeder und Kuboktaeder, Oktaeder und Würfelstümpfe oder auch die jüngst entdeckten Füllungen, bei denen Oktaeder beziehungsweise Tetraederstümpfe zwischen sich nur noch für kleine Tetraeder mit einem Drittel der Kantenlänge Platz lassen (Spektrum der Wissenschaft 2/2012, S. 68).

Bei allen genannten Raumfüllungen – und den meisten anderen – machen drei der fünf platonischen (höchst regelmäßigen) Körper samt ihren Abkömmlingen die Sache unter sich aus. Entweder ist der Baustein selbst ein Tetraeder, Oktaeder und Würfel, oder er ist aus einem solchen herzuleiten, indem

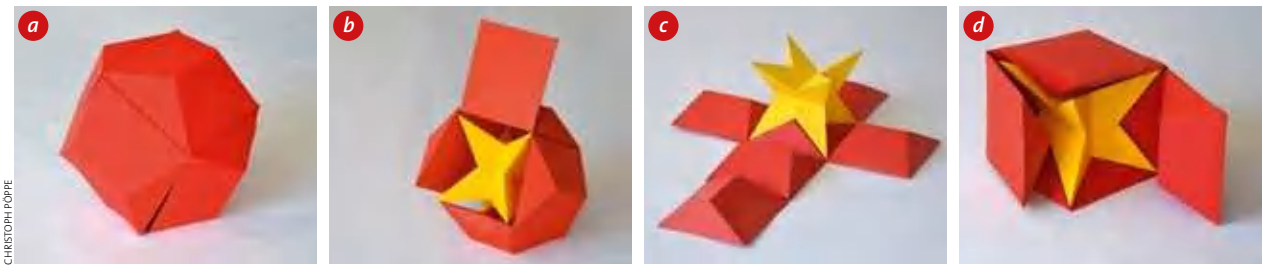
Die Bilunabirotunda, hier mit teilweise ausgefüllten Flächen im Geomag-Modell, wird von vier Fünfecken, zwei Quadraten und acht Dreiecken begrenzt. Je zwei Fünfecke bilden ziemlich scharfe Winkel miteinander; die Symmetrie ist die relativ bescheidene des Quaders mit nur drei Spiegelebenen, die paarweise rechtwinklig zueinander stehen.
Alle Stereobildpaare dieses Artikels sind fürs Parallelschielen angeordnet: Betrachten Sie das linke Teilbild nur mit dem linken und gleichzeitig das rechte nur mit dem rechten Auge!

Die innere Verwandtschaft zweier platonischer Körper

Im Dodekaeder steckt ein Würfel, der seine acht Ecken mit jenem gemeinsam hat. Er kommt zum Vorschein, indem man vom Dodekaeder sechs dachförmige Polyeder abschneidet. Es handelt sich um modifizierte Pyramiden mit quadratischer Grundfläche: Sie haben zwei Spitzen und einen First dazwischen. Die Quadratseiten sind Fünfecksdiagonalen, und die anderen Kanten sind zugleich solche des Dodekaeders. Das Verhältnis der beiden Kantenlängen ist der goldene Schnitt $\tau = (\sqrt{5} + 1)/2$, denn das ist das Verhältnis von Diagonale zu Kante des regelmäßigen Fünfecks.

Jedes »Dach« hat ein Quadrat über der langen Seite als Grundfläche, darüber zwei gleichschenklige Dreiecke (mit einer langen und zwei kurzen Seiten) und zwei gleichschenklige Trapeze (eine lange und drei kurze Seiten). Mit ihren langen Seiten vereinen sich je ein Dreieck und ein Trapez aus benachbarten Dächern zu einem Fünfeck des Dodekaeders.

Wickelt man in diesem Modell die sechs Dächer ab, die zusammen die Oberfläche des Dodekaeders bilden (*a*), tritt ein würfelförmiger Hohlraum zu Tage (*b*; der gelbe Stern dient hier nur als Abstandshalter). Man kann die sechs Dächer in der Ebene ausbreiten (*c*) und andersherum zum Würfel zusammenwickeln (*d*). Im Inneren passen die Dachgiebel bündig aneinander und lassen zwischen sich einen Hohlraum in Form des gelben, nur eingeschränkt symmetrischen Sterns. Diese »Abwicklung« stammt von Carl Kemper (Spektrum der Wissenschaft 2/1991, S. 6).



CHRISTOPH PÖPPE

man ihn auf symmetrische Weise, das heißt alle seine Flächen gleich behandelnd, modifiziert. Der Oktaederstumpf entsteht aus dem Oktaeder, indem man jede seiner Ecken samt einem Drittel aller anliegenden Kanten abschneidet. Das Rhombendodekaeder ist ein Würfel, dem auf jede Fläche eine Pyramide geeigneter Höhe aufgesetzt wird.

Die beiden anderen platonischen Körper Dodekaeder und Ikosaeder sind an diesem Spiel dagegen praktisch nicht beteiligt. Dafür gibt es einen guten Grund: Die Raumfüllung soll periodisch sein – das heißt, es soll eine »Elementarzelle« aus einem oder mehreren Bausteinen geben, von der sich beliebig viele Exemplare parallelverschoben genau passend aneinandersetzen lassen. Das verträgt sich nicht gut mit der fünfzähligen Symmetrie dieser beiden Körper. Obendrein will ein Fünfeck vom Dodekaeder nicht recht an ein Quadrat vom Würfel passen.

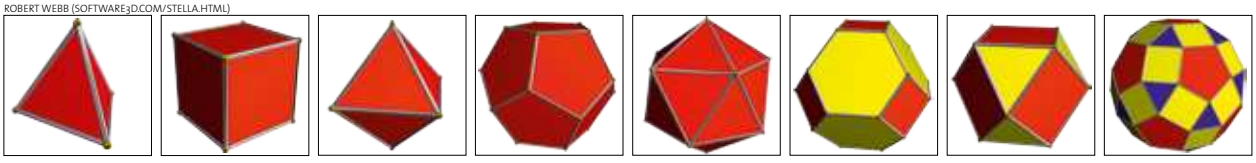
Johnsons wilde Polyeder

Aber das Problem lässt sich überwinden. Es gibt zwar keine oberflächliche Beziehung zwischen den beiden Körpern, aber eine tief innerliche. Im Dodekaeder steckt nämlich ein Würfel. Genauer: Von den 20 Eckpunkten des Dodekaeders sind acht zugleich Ecken eines Würfels; dabei gibt es fünf verschiedene Möglichkeiten, diese acht Punkte auszuwählen (Kasten S. 61).

Diese Beziehung wird sich zwar als hilfreich herausstellen; aber trotzdem kann man die beiden ungleichen Körper nicht einfach aneinandersetzen. Ein dritter Körper muss zwischen ihnen vermitteln; und da er sich beiden anpassen muss, kann er nicht mehr ganz so regelmäßig sein. Man wird fündig bei den so genannten Johnson-Polyedern (Kasten unten).

Das Polyeder unserer Wünsche hat in Johnsons Liste die Nummer 91 und hört auf den nicht ganz selbsterklärenden Namen »Bilunabirotunda«, was ungefähr als »Doppelmond-Doppelrotunde« zu übersetzen wäre (Bild S. 61 oben). Was Johnson fantasievoll einen »Mond« nennt, würde ich eher als Schuhsohle bezeichnen. Es handelt sich um ein Quadrat mit Dreiecken an zwei gegenüberliegenden Seiten.

ROBERT WEBB (SOFTWARE3D.COM/STELLA.HTML)



Tetraeder (3, 3, 3) | Würfel (4, 4, 4) | Oktaeder (3, 3, 3, 3) | Dodekaeder (5, 5, 5) | Ikosaeder (3, 3, 3, 3, 3) | Oktaederstumpf (4, 6, 6) | Kuboktaeder (3, 4, 3, 4) | kleines Rhombikosidodekaeder (3, 4, 5, 4)

Johnson-Polyeder – die weniger schönen Verwandten

Unter den Polyedern (den von ebenen Flächen begrenzten Körpern) genießen traditionell die fünf platonischen Körper (oben links) das höchste Ansehen. Sie sind die regelmäßigsten, denn sie sind von lauter gleichen regelmäßigen Vielecken begrenzt und obendrein eckenkongruent; das heißt, zu je zwei Ecken gibt es stets eine Kongruenzabbildung, die den Körper auf sich selbst und die eine Ecke auf die andere abbildet.

Auf dem zweiten Rang stehen die 13 archimedischen Körper (Beispiele oben rechts). Sie dürfen verschiedenartige Flächen enthalten, müssen aber nach wie vor eckenkongruent sein. Der Oktaederstumpf, das Kuboktaeder und das kleine Rhombikosidodekaeder sind archimedische Körper.

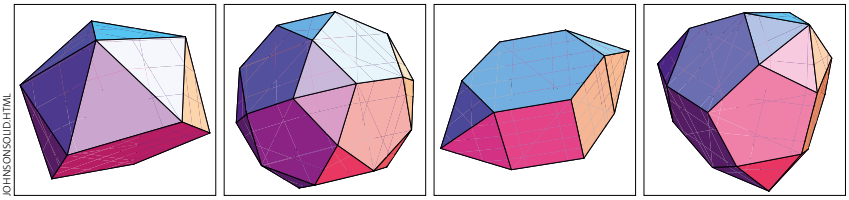
Gleichrangig damit sind die unendlich vielen Prismen und Antiprismen. Ein Prisma besteht aus einem regelmäßigen *n*-Eck als Boden, quadratischen Wänden und wieder einem regelmäßigen *n*-Eck als Dach. Bei einem Antiprisma sind Boden- und Dachfläche um eine halbe Kante gegeneinander verdreht, und die Wände bestehen aus gleichseitigen Dreiecken, die mit der Spitze abwechselnd nach oben und nach unten weisen.

Was bleibt übrig, wenn man nur noch fordert, dass der Körper von regelmäßigen Vielecken begrenzt und konvex, das heißt ohne einspringende Ecken oder gar Löcher, sein soll? Ein buntes Sortiment aus ziemlich wild geformten Körpern. Der amerikanische Mathematiker Norman W. Johnson hat 1966 eine Liste von 92 Stück zusammengestellt; drei Jahre später hat Victor Zalgaller bewiesen, dass Johnson keinen übersehen hatte.

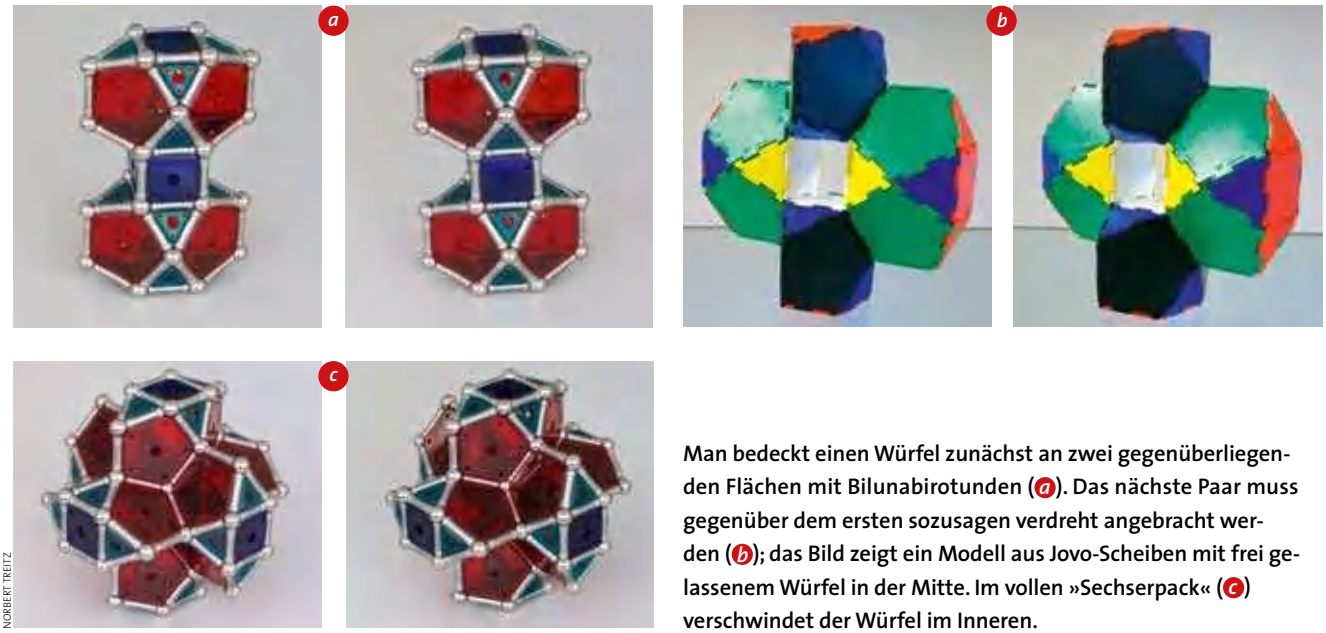
Die meisten kann man durch Zerschneiden oder Zusammenkleben entlang bereits vorhandener Kanten aus schon bekannten Polyedern erzeugen. So kann man vom regulären Ikosaeder fünfzählige Pyramiden abschneiden und dabei nicht nur das fünfzählige Antiprisma, sondern auch neue Polyeder bekommen.

Neun können nicht auf diese Weise hergeleitet werden und sind darum besonders interessant; Johnson hat ihnen die Nummern 84 bis 92 gegeben.

MATHWORLD.WOLFRAM.COM/JOHNSONSOLID.HTML



Johnsons Polyeder J11: gekapptes Ikosaeder | J34: fünfseitige Doppelkuppel | J55: sechsseitiges Prisma mit zwei Pyramiden | J61: Dodekaeder mit drei Pyramiden



NORBERT TREITZ

Man bedeckt einen Würfel zunächst an zwei gegenüberliegenden Flächen mit Bilunabirotunden (a). Das nächste Paar muss gegenüber dem ersten sozusagen verdreht angebracht werden (b); das Bild zeigt ein Modell aus Jovo-Scheiben mit frei gelassenem Würfel in der Mitte. Im vollen »Sechserpack« (c) verschwindet der Würfel im Inneren.

Wie erzeugt man nun mit Würfeln, Bilunabirotunden und Dodekaedern eine Raumfüllung? Auf dem Weg zur Lösung stellt sich als erste Teilaufgabe, Bilunabirotunden passgenau an einen Würfel zu setzen.

Die Formen der Körper legen die Lösung nahe: Man füge Quadrat an Quadrat – geeignet verdreht, damit die etwas ausladenden Bilunabirotunden einander nicht in die Quere kommen. Insgesamt kann man Würfel mit einem Sechserpack aus Bilunarotunden einhüllen (Bilder oben). Diese passen wundersamerweise mit ihren Dreiecksflächen genau zusammen und halten auf ihrer Außenseite achtmal je drei aneinandergrenzende Fünfecke bereit.

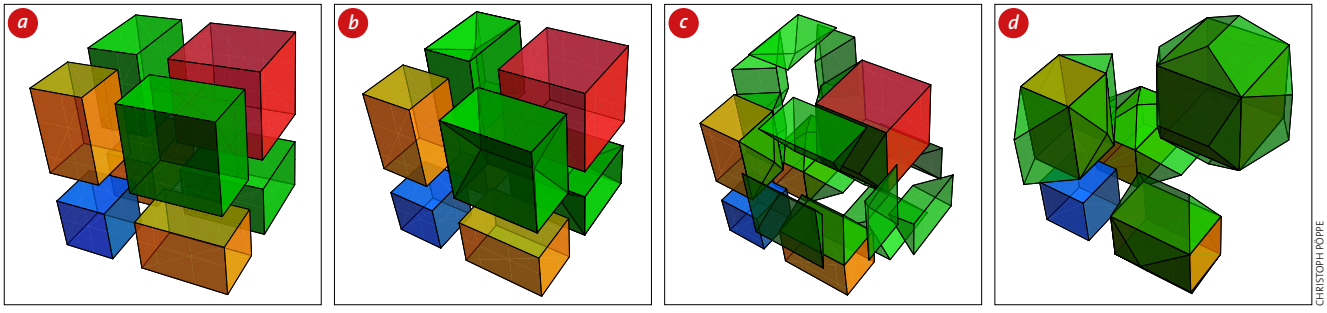
An diese Plätze kann man Dodekaeder setzen und durch Fortsetzung des Verfahrens die gesuchte Raumfüllung erzeugen. Dass das tatsächlich funktioniert, zeigen wir, indem wir den Raum zunächst mit (sehr großen) Würfeln füllen, jeden von ihnen auf die gleiche Weise zersägen und die Teile dann zu einem (kleinen) Würfel, einem Dodekaeder und drei Bilunabirotunden zusammensetzen.

Geometrie mit Säge und Leim

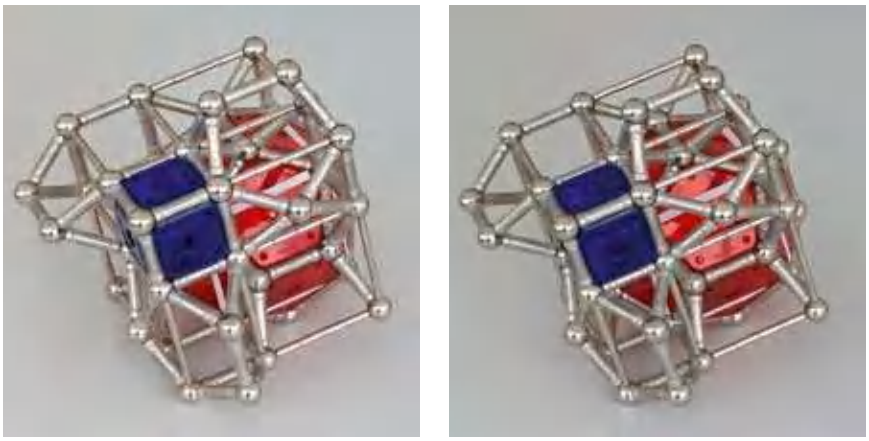
Ein solcher »Urwürfel« soll die Kantenlänge $a+d$ haben; dabei ist a die gemeinsame Kantenlänge aller Bausteine, die am Ende entstehen werden, und d verhält sich zu a wie die Diagonale des regelmäßigen Fünfecks zu seiner Kante: $d=\tau a$ (siehe Kasten S. 61). Wir zersägen nun den Urwürfel in den drei verschiedenen Raumrichtungen parallel zu seinen Seitenflächen, so dass alle Kanten in Teile der Längen a und d zerschnitten werden (Bild unten, a). Dabei entstehen ein Würfel der Kantenlänge a, einer der Kantenlänge d, drei Quader mit den Kantenlängen a, a und d (die »Stangen«) und drei mit den Kantenlängen a, d und d (die »Platten«).

Die Platten zerkleinern wir weiter. Und zwar schneiden wir zwei (unregelmäßige) Pyramiden aus ihnen heraus. Deren Grundflächen sind zwei gegenüberliegende (nichtquadratische) Seitenflächen der Platte mit den Kantenlängen a und d, und die vier Kanten, die zur Spitze jeder Pyramide führen,

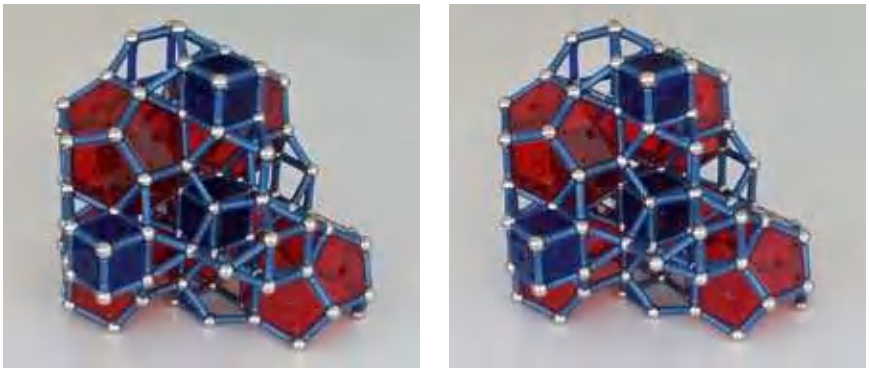
Ein Würfel der Kantenlänge $a+d$ wird zunächst (a) zerlegt in einen kleinen Würfel der Kantenlänge a (blau), einen großen der Kantenlänge d (rot), drei »Stangen« (orangegelb) und drei »Platten« (grün). Jede Platte wird anschließend zersägt in zwei Pyramiden, zwei flache und zwei steile Dächer (b). Die Fragmente werden dem jeweils nächstgelegenen Teilkörper zugeschlagen (c) und ergeben mit diesen zusammen ein Dodekaeder und drei Bilunabirotunden (d).



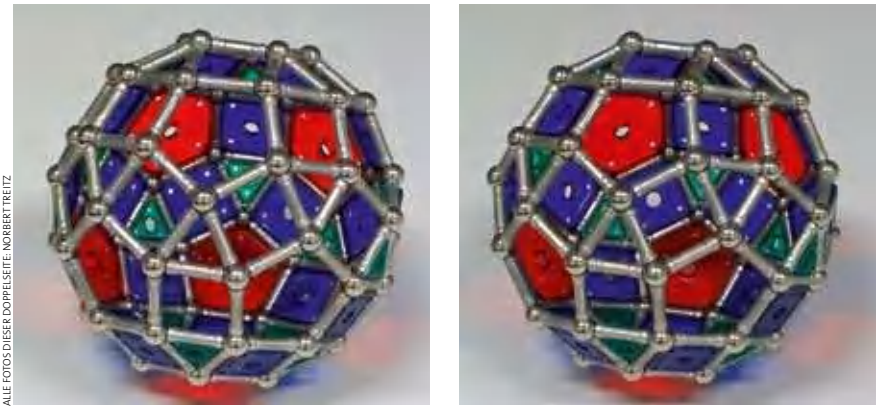
CHRISTOPH PÖPPE



Geomag-Modell der Elementarzelle aus einem Würfel (blau), einem regulären Dodekaeder (rot) und drei Bilunabirotunden. Man lasse in der Vorstellung alle Kugeln zu Punkten und alle Stäbe zu unendlich dünnen Kanten schrumpfen. Dann haben alle Stäbe die Kantenlänge *a*. Die aufgeklebten Papierstreifen markieren Fünfecksdiagonalen, die dünnen, aus je vier Teilen zusammengesetzten Stäbe zu ihnen parallele Strecken. Die überstehenden Dächer dieser Zelle passen genau in ihre Einbuchtungen auf der gegenüberliegenden Seite.



Ein Ausschnitt aus der Raumfüllung: Dodekaeder (rot) haben entlang von Kanten Kontakt miteinander, Würfel mit Dodekaedern nur an einzelnen Eckpunkten und Würfel miteinander gar nicht.



ALLE FOTOS DIESER DOPPELSEITE: NORBERT TREITZ

Das kleine Rhombikosidodekaeder (3, 4, 5, 4): In diesem Geomag-Modell sind zur besseren Durchsicht die dem Betrachter zugewandten Flächen nicht ausgefüllt.

haben ebenfalls die Länge *a* (Bild S. 63 unten, *b*). Wir verbinden die Spitzen beider Pyramiden durch eine Kante. Wie sich herausstellt, hat auch sie die Länge *a*. Zu ihr verlaufen vier Kanten der verstümmelten Platte parallel. Wir führen Sägeschnitte von jeder dieser Kanten zur zentralen Kante. Somit zerfällt die ganze Platte in die beiden genannten Pyramiden sowie zwei flache und zwei spitze »Dächer«; allen Dächern dient die zentrale Kante als Dachfirst.

Die flachen Dächer sind nun genau diejenigen, die den großen Teilwürfel zum Dodekaeder ergänzen. Wir verschieben die Fragmente jeder Platte in Richtung auf den jeweils angrenzenden Teilkörper. Dabei geraten die flachen Dächer an die großen Würfel, die spitzen Dächer an zwei der vier nichtquadratischen Seitenflächen der Stangen und die Pyramiden an die beiden anderen (Bild S. 63 unten, *c*). Und siehe da: Aus dem großen Würfel wird ein Dodekaeder und aus jeder Stange eine Bilunabirotunda, was zu beweisen war.

Man beachte, dass bei dieser Prozedur gewisse Fragmente einer Platte von einem Urwürfel zum benachbarten wechseln (Bild S. 63 unten, *d*). Anders ausgedrückt: Nimmt man dem Urwürfel genau diese Fragmente an einer Seite weg und fügt sie an der gegenüberliegenden Seite an, so erhält man die Elementarzelle unserer Raumfüllung (Bild links oben), bestehend aus drei unterschiedlich orientierten Bilunabirotunden, einem Würfel der Kantenlänge *a* und einem Dodekaeder der gleichen Kantenlänge. Beliebig viele Elementarzellen kann man nun in allen drei Raumrichtungen bündig aneinandersetzen (Bild links Mitte).

Ein Dodekaeder hat jeweils eine Kante (den Dachfirst) mit seinen sechs Nachbardodekaedern oben, unten, links, rechts, vorne und hinten gemeinsam und grenzt mit acht Ecken an jeweils einen Würfel. Diese Würfel passen genau zwischen die Dodekaeder, und dazwischen noch die Bilunabirotunden in dreifacher Anzahl.

Überraschenderweise lässt sich das Sechserpack aus einem Würfel und den

Acht Exemplare dieses Restkörpers (links) plus zwölf Fünfeckspyramiden ergänzen das Sechserpack zum kleinen Rhombikosidodekaeder. Hier sind nur die fünfeckigen Flächen ausgefüllt. Das rechts abgebildete Modell besteht ausschließlich aus den acht Restkörpern, die zwölf Pyramiden erscheinen hier also als Krater.

sechs aufgesetzten Bilunabirotunden noch auf ganz andere Weise ergänzen. Das Ergebnis ist diesmal nicht eine unendliche periodische Raumfüllung, sondern einer der komplizierteren unter den archimedischen Körpern.

Vom Innenleben des kleinen Rhombikosidodekaeders

Leider haben sich für diese Körper keine einheitlichen Bezeichnungen etabliert. Wer auf Klarheit Wert legt, zählt der Reihe nach die Vielecke auf, die jeder Ecke anliegen (es sind definitionsgemäß an jeder Ecke die gleichen). Für unseren Körper – man nennt ihn meistens das kleine Rhombikosidodekaeder – ist diese Eckenfigur (3, 4, 5, 4) (Bild S. 64 unten). Es hat mit dem Dodekaeder und dem Ikosaeder deren beachtliche Symmetrie gemeinsam: 15 Spiegelebenen (durch je ein Paar von Kanten), sechs fünfzählige Drehachsen (durch je ein Paar von Fünfecksmittelpunkten oder Ikosaederecken), zehn dreizählige (durch je ein Paar von Dodekaederecken oder Ikosaeder-Dreiecksmittelpunkten) und 15 zweizählige (durch je ein Paar von Mitten gegenüberliegender Kanten).

Das kleine Rhombikosidodekaeder – nennen wir es im Folgenden einfach (3, 4, 5, 4) – entsteht aus dem Dodekaeder oder auch dem Ikosaeder durch geeignetes Abschneiden sämtlicher Ecken und Kanten oder – weniger destruktiv – durch eine spezielle Art des Brötchenbackens: Man forme aus Brotteig ein Dodekaeder und ritze mit einem scharfen Messer sämtliche Kanten ein. Wenn man es dann in den vorgeheizten Backofen schiebt, gehen wie beim klassischen Brötchen die eingeritzten Kanten auf, bis sie so breit wie lang sind, während die Fünfecksflächen im Wesentlichen unverändert bleiben. An den Ecken des Dodekaeders tun sich Dreiecke auf. Mit dem Ikosaeder an Stelle des Dodekaeders funktioniert es übrigens genauso.

Insgesamt hat das (3, 4, 5, 4) zwölf Fünfecke, so viele, wie das Dodekaeder Flächen und das Ikosaeder Ecken hat. Es hat 20 Dreiecke wie das Ikosaeder – das sind so viele, wie das Dodekaeder Ecken hat – und 30 Quadrate: so viele, wie beide jeweils Kanten haben.

Es stellt sich nun heraus, dass sich unser Sechserpack perfekt in diesen Körper einpassen lässt. Dessen äußerste Teile, die sechs »Schuhsohlen« (»lunae« bei Johnson) fallen genau mit den gleich aussehenden Teilen der Oberfläche des (3, 4, 5, 4) zusammen. Das ist mit den hier abgebildeten Baukastenteilen sofort zu sehen, aber nicht einfach nachzurechnen. Das ganze kleine Rhombikosidodekaeder kann man zusammensetzen aus dem zentralen Würfel, den sechs Bilunabirotunden, zwölf fünfzähligen Pyramiden und acht nichtkonvexen Restkörpern.

Von diesen hat jeder auf der Seite, die im fertigen Objekt nach innen weist, drei Fünfecke wie im Dodekaeder und auf der anderen, der »Außenseite«, ein Dreieck mit drei angrenzenden Quadraten wie im (3, 4, 5, 4), abgeschlossen durch dreimal zwei Dreiecke, die drei Talfalten bilden (Bild oben, links).

Lässt man nun das innere Sechserpack weg, so entsteht aus den verbleibenden zwölf Pyramiden und acht Restkörpern ein sehr interessanter, hochsymmetrischer Hohlkörper (Bild oben, rechts). Er sieht von außen aus wie das komplette (3, 4, 5, 4), hat aber vier Öffnungen in Gestalt der »lunae«. Damit hat er immerhin noch die Symmetrie des Quaders, seine konvexe Hülle (also das (3, 4, 5, 4)) aber die weiter gehende des regulären Dodekaeders oder Ikosaeders.

DER AUTOR

Norbert Treitz ist pensionierter Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen.

WEBLINKS

www.mathcurve.com/polyedres/polyedres.shtml
Großes Sortiment von Polyedern mit zahlreichen Erläuterungen und Videosequenzen (französisch). Von Robert Ferréol

www.georgehart.com/virtual-polyhedra/vp.html
Ebenfalls großes Polyedersortiment von George Hart (englisch)

http://mathworld.wolfram.com/Polyhedron.html
Verweist auf zahlreiche Polyeder in Eric Weissteins »Math World« (englisch)

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1139709

SERIE ENERGIE | TEIL 4

Tank gegen Teller

Biokraftstoffe sind umstritten. Am schwersten wiegt der Einwand, dass sie Anbauflächen beanspruchen, die dann nicht mehr für die Nahrungsmittelproduktion zur Verfügung stehen. Fortschritte in der Landwirtschaft wie in der Kraftstoffherstellung sollen diese Konkurrenz entschärfen.

Von Duncan Graham-Rowe

Als die Formel-1-Rennfahrer von Ferrari vor zwei Jahren beim Großen Preis von Bahrain den ersten und zweiten Platz belegten, hatten sie eine außergewöhnliche Mischung in ihren Tanks: Der Sprit enthielt einen kleinen Anteil von Biokraftstoff der so genannten zweiten Generation, gewonnen aus Lignozellulose (siehe Beitrag S. 74). Selbst die oktangeschwängerte Welt der Formel 1 stellt sich also langsam der Realität des Klimawandels und der schwindenden Ölreserven. Seit 2008 schreibt das Formel-1-Reglement vor, dass mindestens 5,75 Prozent des Kraftstoffs aus pflanzlichen Quellen stammen müssen. Der beigemischte Biosprit in den Tanks der Ferraris erfüllte dies in vorbildlicher Weise, indem er aus nichtessbaren Pflanzenteilen gewonnen wurde. Damit machte der renommierte Rennstall vor, wie Biokraftstoffe unseren Energiehunger stillen können, ohne die Nahrungsmittelproduktion zu gefährden.

Nach Angaben der Welternährungsorganisation FAO stiegen die Nahrungsmittelpreise in jüngster Vergangenheit außergewöhnlich stark. Kritiker lasten das dem zunehmenden Gebrauch von Biotreibstoffen der ersten Generation an. Diese werden aus essbaren Teilen von Nahrungspflanzen – etwa Zuckerrohr oder Mais – hergestellt und anschließend dem gewöhnlichen Benzin oder Diesel beigemischt. In vielen Entwicklungsländern kommt es wegen der hohen Lebensmittelpreise zu sozialen Unruhen. Ist es da ethisch überhaupt vertretbar, dass westliche Regierungen die Nutzung von Biokraftstoffen zunehmend fördern? Lassen sich Klimaschutz und Nahrungsversorgung unter einen Hut bringen?

Für Ferrari lautet die Antwort eindeutig Ja. Das Team entschied sich für Ethanol aus Stroh, das in der Landwirtschaft als Restprodukt anfällt – ein Beispiel dafür, wie sich die derzeitigen Probleme der Biokraftstoffe überwinden lassen. Neue chemische Verfahren, bessere Landnutzungsstrategien und höhere landwirtschaftliche Erträge könnten uns den Weg aus der Zwickmühle »Tank oder Teller« weisen.

Die Idee, aus Anbaupflanzen Treibstoff zu gewinnen, ist nicht neu. Bereits im 19. Jahrhundert fuhren die Motoren von Rudolf Diesel mit pflanzlichen Ölen. Und die Brasilianer mischen ihrem Benzin seit 1929 Ethanol bei, der aus Zuckerrohr stammt. Doch erst seit gut zehn Jahren spielen Biokraftstoffe eine wichtige Rolle in der globalen Energie- und Klimapolitik. Dem zu Grunde liegen die zunehmende Angst um die sichere Versorgung mit Erdöl, die Befürchtungen hinsichtlich des Klimawandels und der unerbittlich wachsende Energiehunger.

Die Eile, mit der Biokraftstoffe weltweit eingeführt wurden, haben indes zu handfesten Landnutzungskonflikten geführt. Auf dem malaiischen Teil Borneos etwa rodeten Bauern und Großunternehmer riesige Dschungelgebiete, um sie durch Palmölplantagen zu ersetzen. Andernorts werden enorme Mengen von geernteten Nahrungspflanzen – etwa Mais – zu Bioraffinerien transportiert, um sie dort in Sprit zu verwandeln. 2007 pflanzten US-Farmer Mais auf der Rekordfläche von 375 000 Quadratkilometern an. Nicht weniger als ein Drittel davon ging in die Ethanolherstellung. Das war nach Ansicht mancher Fachleute der Grund dafür, dass die Maispreise gegen Ende 2010 um mehr als 70 Prozent anstiegen. Zu Beginn des Jahres 2011 verzeichnete die Welternährungsorganisation einen Höchststand bei ihrem Index der Lebensmittelpreise.

Bei genauer Betrachtung zeigt sich allerdings, dass Biokraftstoffe nur ein Teil des Problems sind. Gemäß dem Weltbankreport »A Note on Rising Food Prices« von 2008 waren sie zwar hauptverantwortlich dafür, dass die Lebensmittelpreise in den vergangenen Jahren nach oben kletterten, doch

ÜBERBLICK

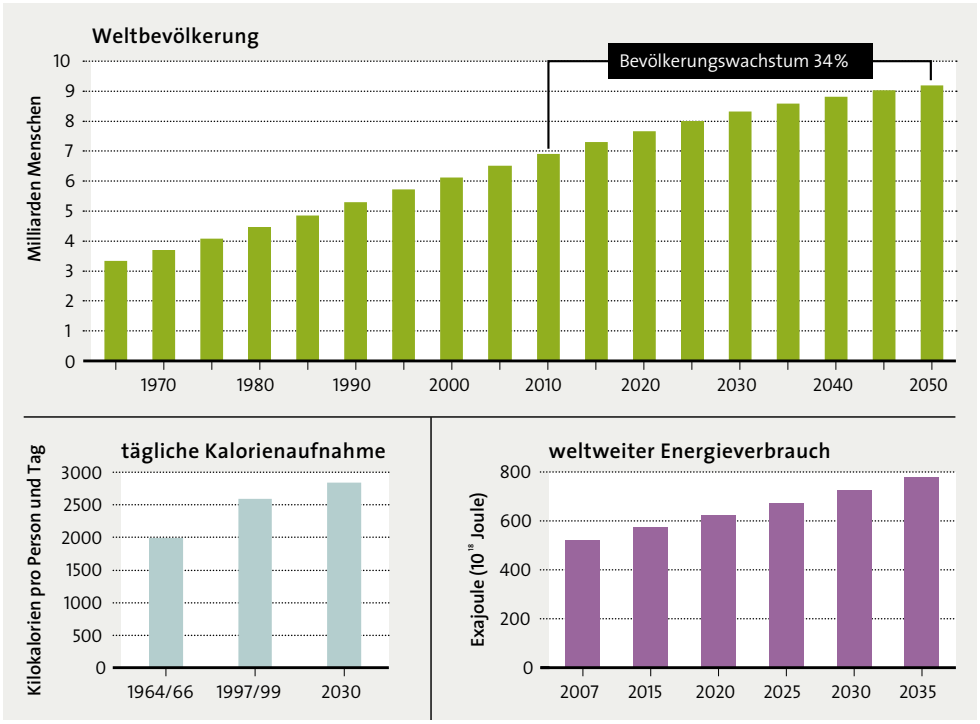
DIE ZUKUNFT DER ENERGIE

Teil 1	Strom aus der Sonne	Dezember 2011
Teil 2	Windräder	Januar 2012
Teil 3	Wasserkraft	Februar 2012
Teil 4	**Biotreibstoffe**	**März 2012**
Teil 5	Energiespeicher I: Batterien	April 2012
Teil 6	Energiespeicher II: Wasserstoff	Mai 2012

Ausdauernde Gräser der Gattung *Miscanthus* eignen sich möglicherweise gut als künftige Energiepflanzen, da sie schnell wachsen und anspruchslos sind.

FOTOLIA / HJ SCHNEIDER

Im Jahr 2050 werden voraussichtlich neun Milliarden Menschen auf der Welt leben – 34 Prozent mehr als heute. Darüber hinaus wachsen Kalorienverzehr und Energieverbrauch pro Kopf stetig an. Deshalb wird die Nachfrage nach Lebensmitteln und Kraftstoffen drastisch zunehmen. Um damit Schritt zu halten, müssen Landwirtschaft und Industrie künftig deutlich mehr produzieren.



Börsenspekulationen und extreme klimabedingte Ereignisse trugen ebenfalls dazu bei. Auch dürfen die steigenden Kosten für Erdöl nicht außer Acht gelassen werden. Sie haben einen direkten Einfluss auf Nahrungsmittelpreise, sagt Ottoline Leyser. Die Pflanzengenetikerin an der Cambridge University (Großbritannien) hat ein Gutachten über Biokraftstoffe mitverfasst, das der Nuffield Council on Bioethics – eine gemeinnützige britische Organisation, die sich mit bioethischen Fragen befasst – unlängst herausgab. Um Ernten einzubringen, zu transportieren und zu verarbeiten, bedarf es Leyser zufolge viel Energie, hauptsächlich in Form fossiler Kraftstoffe.

Aber die Nahrungsmittelpreise sind nicht die einzigen Kritikpunkte. Obwohl die meisten Biokraftstoffe nicht speziell dafür entwickelt worden sind, den Ausstoß von Treibhausgasen zu vermindern, erwartet man dies doch von ihnen.

AUF EINEN BLICK

DER LANGE WEG ZUM BESSEREN BIOSPRIT

1 Die Lebensmittelpreise sind in den vergangenen Jahren stark gestiegen. Kritiker lasten dies dem zunehmenden Gebrauch von Biokraftstoffen an. Denn diese Kraftstoffe werden **bislang aus essbaren Pflanzen wie Mais** hergestellt, was das Angebot auf den Nahrungsmittelmärkten verknappt.

2 Neue Technologien könnten helfen, die Konkurrenz zwischen Tank und Teller zu entschärfen, etwa das **Züchten spezieller Gewächse** oder Produktionsverfahren für Biosprit, die auch **holzige Pflanzenteile** verwerten. Zudem lassen sich die Ernteerträge vielerorts noch deutlich steigern.

3 Es wird zwar Jahre dauern, diese Ansätze in großem Maßstab umzusetzen, doch die ersten Fabriken sind **bereits im Bau**.

Nigel Mortimer vom englischen Energieberatungsunternehmen North Energy hat jedoch in einer Analyse gezeigt, dass Biokraftstoffe oft nur minimal besser dastehen als fossile Kraftstoffe, was die Treibhausgasemission anbelangt. Und laut Angela Karp, wissenschaftliche Direktorin am landwirtschaftlichen Forschungszentrum Rothampsted im britischen Harpenden, werden für Biokraftstoffe der ersten Generation oft große Mengen an Wasser und Stickstoff benötigt, um genügend Pflanzenmasse wachsen zu lassen. Das wirkt sich ebenfalls negativ auf ihre Klimabilanz aus. Kenneth Stone, Agraringenieur an der Forschungseinrichtung Agricultural Research Service in Florence (South Carolina, USA), kommt zu dem Schluss, dass sich der Wasserverbrauch in der Landwirtschaft versechsfachen würde, wenn man gemäß den Zielen des US-Energieministeriums künftig verstärkt Bioethanol aus Mais herstellen würde.

Dennoch bleibt der Kampf um die Anbauflächen eines der schwierigsten Probleme. Idealerweise sollte die Herstellung von Biokraftstoffen nur geringwertige, kohlenstoffarme Äcker in Anspruch nehmen, sagt Ian Crute, Chefwissenschaftler im Agriculture and Horticulture Development Board (Entwicklungsausschuss für Landwirtschaft und Gartenbau) im englischen Kenilworth. Tatsächlich aber bauen immer mehr Farmer Energiepflanzen auf hochwertigen Böden an, die eigentlich für die Nahrungsmittelproduktion vorgesehen sind, weil sie damit hohe Erlöse erzielen können. Das betont Olivier Dubois, Koordinator der FAO-Bioenergiegruppe in Rom. Um diesen Konflikt zu entschärfen, müsse zusätzliches Land urbar gemacht werden.

Einen ähnlichen Verdrängungswettbewerb gibt es bei der Viehzucht. Bruce Dale, Chemieingenieur an der Michigan

State University in East Lansing, fand heraus, dass mehr als 80 Prozent der US-amerikanischen Landwirtschaftsproduktion als Viehfutter dienen. »Eine unglaubliche Verschwendung«, kommentiert Leyser. Der weltweit zunehmende Fleischkonsum erweist sich somit als weiterer wichtiger Grund dafür, dass die Nahrungsmittelpreise in die Höhe schießen.

Zugleich wird es mit zunehmender Weltbevölkerung immer schwieriger, genügend neue Anbauflächen zu erschließen. In 40 Jahren werden voraussichtlich neun Milliarden Menschen auf der Welt leben, also 2,3 Milliarden mehr als heute, die ernährt werden müssen, wie der FAO-Bericht »How to feed the world in 2050« vermerkt. Schlimmer noch: Weil Fleischkonsum und Kalorienverzehr pro Kopf stetig zunehmen, steigt der Bedarf an Lebensmitteln überproportional an. »Im Jahr 2050 brauchen wir 70 Prozent mehr Nahrungsmittel«, schätzt Dubois. Die Nutzung von Pflanzen zur Energiegewinnung verschärft die Situation weiter. In den kommenden 25 Jahren nimmt der Energieverbrauch in den Schwellenländern voraussichtlich um 84 Prozent zu. Nahezu ein Drittel davon wird vermutlich aus Biokraftstoffen stammen.

Wenn die Landwirtschaft weltweit nicht schon bald einen deutlichen Entwicklungsschub erfährt, werden diese Entwicklungen zu einer dramatischen Verknappung von Anbauflächen führen – sowohl für Nahrung als auch für Biotreibstoffe. Zwar ließen sich die landwirtschaftlich nutzbaren Flächen in den kommenden vier Jahrzehnten theoretisch verdoppeln. Doch rechnet die FAO in diesem Zeitraum nur mit einem Zuwachs von etwa fünf Prozent, weil viele anbaufähige Gebiete voraussichtlich dem Wachstum der Städte anheimfallen werden. Um die landwirtschaftliche Produktivität zu erhöhen, müssen deshalb die Ernteerträge deutlich steigen, meint Dubois.

Leider sprechen die bisherigen Entwicklungen eine andere Sprache. Zwar wuchsen die globalen Ernteerträge innerhalb der letzten 50 Jahre, jedoch mit abnehmendem Tempo: Die Steigerungssrate fiel von 3,2 Prozent im Jahr 1960 auf 1,5 Prozent im Jahr 2000. Dennoch ist Ian Crute hoffnungsvoll. Es gäbe trotz alledem immer noch Wachstum, sagt er, und außerdem jede Menge Raum für Verbesserungen. So exis-

Biokraftstoffe der zweiten Generation: Im Karlsruher Institut für Technologie entsteht zurzeit die bioliq-Pilotanlage, die Stroh und Holz zu Biosprit verarbeiten soll.

KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE (KIT)

tierten nach wie vor enorme Ertragsunterschiede zwischen den Ländern und damit noch viel »Luft nach oben«. Beispielsweise liegen große Flächen in Afrika brach, hauptsächlich deshalb, weil sie unzureichend an die Infrastruktur angebunden sind. Die dortigen Bauern haben keine Möglichkeit, ihre Produkte auf den Markt bringen, und pflanzen folglich nur das an, was ihre Familien benötigen, erläutert Crute. Der Anbau von Energiepflanzen in diesen Regionen könnte einen positiven Einfluss haben sowohl auf die Infrastruktur als auch auf die Nahrungsmittelproduktion.

Auch die Gentechnik könnte die Landwirtschaft beflügeln. Schon heute hilft sie, Pflanzen widerstandsfähiger gegen Schädlinge zu machen. »Bald werden wir auch Maissorten erzeugen, die weniger Wasser benötigen und Trockenzeiten besser überstehen«, prognostiziert Crute. Zudem arbeiten die Forscher an salztoleranten Pflanzen. Sie sollen etwa in Regionen angepflanzt werden, in denen ein steigender Meeresspiegel zur Versalzung des Grundwassers führt. Mais und einige andere Pflanzen besitzen überdies deutlich effizientere Fotosynthesemechanismen als Weizen oder Reis, wie Crute betont. Diese könnten mittels Gentechnik von einer Pflanzenart auf andere übertragen werden.

Nicht nur Verbesserungen in der Landwirtschaft und Gentechnik, auch neue Produktionsverfahren für Biokraftstoffe dürften die Konkurrenz zwischen Tank und Teller entschärfen. Gelänge es, die gesamte Pflanze zu verwerten und nicht nur ihre essbaren Teile, ließen sich viel mehr Arten von Biomasse nutzen. In Sprossen, Blättern und Wurzeln ist deutlich mehr Energie gespeichert als in Früchten – diese Energie ist aber schwerer zu gewinnen, sagt Chris Somerville, Direktor am Energy Biosciences Institute der University of California in Berkeley. Deshalb ist die Verwertung kompletter Pflanzen teurer als die derzeitige Produktion von Ethanol aus Mais.

Um für das Ferrari-Team Biosprit aus Stroh herzustellen, nutzte die kanadische Biotechnologiefirma Iogen beispielsweise ein Enzym der Pilzart *Trichoderma reesei*. Mit dessen Hilfe verdaut der Pilz Lignin – einen Hauptbestandteil holziger Pflanzenteile – und gelangt dadurch an Nährstoffe in Bäumen. Es gibt noch andere ligninverdauende Enzyme, allerdings arbeiten die zurzeit verfügbaren allesamt nicht sehr effizient und kosten zwischen 10 und 20 Cent pro Liter erzeugtem Kraftstoff. Ganz im Gegensatz zu den Enzymen für die großtechnische Herstellung von Ethanol aus Mais: Sie kosten etwa einen halben Cent pro Liter.

Es ist zwar möglich, Pflanzen gentechnisch so zu verändern, dass sich ihr Lignin einfacher aufbrechen lässt. Aber bis dahin liege noch ein weiter Weg vor uns, meint Somerville. Mehr Erfolg verspricht der Vorschlag, mittels genetischer Analysen nach besonders energiehaltigen Pflanzen zu fahnden oder diese selektiv zu züchten. Charles Wyman, ein Chemiker und Umweltingenieur an der University of California in Riverside, untersuchte beispielsweise 47 Pappelarten, um herauszufinden, bei welcher sich das Lignin am einfachsten zu Zucker aufschließen lässt. Gemeinsam mit seinen Kollegen ermittelte er eine erreichbare Zuckerausbeute zwischen 28 und 92 Prozent des theoretischen Maximums, abhängig von Gehalt und Struktur des Lignins.

Die ganze Pflanze ist gefragt

Mit verbesserten Technologien, um die bislang nicht nutzbaren Pflanzenteile großtechnisch und kostengünstig zu verwerten, wäre es möglich, dieselben Gewächse mehrfach zu nutzen. Zum Beispiel könnte man die Kolben von Maispflanzen als Lebensmittel verwenden und ihre Stängel und Blätter in Treibstoff umwandeln. Doch so elegant sich das anhört, so kompliziert ist die praktische Umsetzung, betont Dubois: »Pflanzenreste sind auch anderweitig sehr begehrt, nämlich als billiger organischer Dünger.« Der kanadische Agrarwissenschaftler Guy Lafond wies im Jahr 2009 nach, dass die Qualität der Böden bereits zurückgehen würde, wenn man nur 40 Prozent weniger Stroh unterpflügte. Da ist es wenig erstaunlich, dass die Biotechfirma Iogen offenbar Probleme damit hat, genügend von diesem Reststoff aufzutreiben: Ihre Demonstrationsanlage erzeugt im Schnitt nur 256 000 Liter Ethanol pro Jahr, obwohl sie auf 1,9 Millionen Liter ausgelegt ist. Das Unternehmen erklärt die Lücke damit, dass es sich um eine Testanlage handle, die nicht kontinuierlich in Betrieb sei. Wenn aber der Ölkonzern Shell, einer der Hauptinvestoren von Iogen, die Bioethanolproduktion in kommerziellem Maßstab betreiben würde, dann läge der Bedarf bei 20 bis 30 Tonnen Stroh pro Tag, was zu Engpässen führen dürfte.

Um solche Mengen an Biomasse zu gewinnen, wird es nicht reichen, Anbaupflanzen mehrfach zu verwerten, prophezeit die Pflanzengenetikerin Ottoline Leyser. Vielmehr werde es nötig sein, schnell wachsende Pflanzen anzubauen, die nur für die Erzeugung von Biokraftstoff vorgesehen sind. Diese dürften aber nicht mit Nahrungspflanzen um Anbauflächen wetteifern. Schnell wachsende Pappeln oder Weiden etwa könnten auf belasteten Böden wachsen und sie dabei zugleich reinigen. Die Bäume wandeln Kohlendioxid schneller in Biomasse um als die meisten anderen Pflanzen.

Ausdauernde Gräser wie *Miscanthus* oder die Rutenhirse *Panicum virgatum* sind vielleicht noch bessere Kandidaten. Sie brauchen wenig Wasser und speichern Nährstoffe in ih-

ren Wurzeln. »Bei der Ernte holt man nur oberirdische Pflanzenteile ein, die sehr wenig Nährstoffe enthalten«, sagt Leyser, »dadurch wird der Boden kaum ausgelaugt und infolgedessen fast kein Dünger benötigt.« Ausdauernde Gräser wachsen zudem auf Böden, die für Ackerkulturen unbrauchbar sind. Somerville hält den letzten Punkt für entscheidend: So manche Einöde könne zu einer Plantage für Energiepflanzen werden, etwa indem man dort trockentolerante Gewächse wie die Agave anbaut.

FAO-Koordinator Olivier Dubois hingegen meint, dass Biokraftstoffe der zweiten Generation ebenfalls Nachteile haben. Auch sie benötigten Anbauflächen, und selbst die genügsamsten Gewächse würden mit den Nahrungspflanzen um Ressourcen konkurrieren. Zudem habe die Technologie für Bioethanol der ersten Generation bereits ein halbes Jahrhundert Entwicklung hinter sich. »Um Biotreibstoffe der zweiten Generation in großem Maßstab zu produzieren, braucht es noch fünf bis zehn Jahre«, lautet seine Einschätzung.

Einiges tut sich bereits. So baut das Energieunternehmen BP im Highlands County (USA) für 400 Millionen Dollar eine Fabrik, die Zellulose aus energiereichem Zuckerrohr, aus Rutenhirse oder aus *Miscanthus* zu Ethanol verarbeiten soll. Das Werk ist auf eine Produktion von 136 Millionen Liter Treibstoff pro Jahr ausgelegt, was es nach den Kriterien des amerikanischen Energieministeriums zu einer kommerziellen Bioraffinerie machen würde. Obgleich sich die Menge gewaltig anhört, ist sie gering im Vergleich zu den Millionen Litern Benzin pro Tag, die herkömmliche Raffinerien ausstoßen.

Doch auch wenn sie noch eine Weile brauchen werden, um sich durchzusetzen: Die neuen Biokraftstoffe werden kommen. Ob am Ende Flüssigkeiten der zweiten Generation unsere Tanks füllen – und die der Formel-1-Wagen – oder ob es eine dritte und vierte Generation geben wird, sei dahingestellt. So oder so werden sie künftig eine wichtige Rolle spielen, um den globalen Energiehunger zu stillen. Und mit modernen Technologien, umsichtiger Landnutzung und schonendem Umgang mit Ressourcen sollten noch genügend Anbauflächen für Nahrungspflanzen bleiben.

DER AUTOR

Duncan Graham-Rowe arbeitet als Wissenschaftsautor in Brighton (England).

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1139692**

© Nature Publishing Group
www.nature.com
Nature 474, S. 8–9, 23. Juni 2011

Natur
Energie
Plus

Mit der Natur auf einer Welle.

In den letzten zwölf Monaten haben sich über 25.000 Bürger für Strom aus 100 % Wasserkraft von NaturEnergiePlus entschieden. Wann wechseln Sie zum Strom aus sauberer Quelle?

→ Jetzt wechseln!

www.naturenergieplus.de

Kein Zuckerschlecken

Verholzte Pflanzenreste sind zu schade für die Verbrennungsanlage – man könnte Biokraftstoffe aus ihnen herstellen. Doch ihre Zuckerverbindungen aufzuschließen, bereitet Chemikern noch gewaltige Probleme.

Von Katharine Sanderson

Jedes Jahr fallen mehr als 40 Millionen Tonnen feste Pflanzenabfälle an, von den Halmen der Getreideernte bis zu Reststücken aus der Holz verarbeitenden Industrie. Was normalerweise im Häckselwerk oder der Müllverbrennungsanlage endet, könnte die Grundlage für Biotreibstoffe der zweiten Generation werden – anders als bei ihren in Verruf geratenen Vorgängern würde die Herstellung nicht mit der Produktion von Lebensmitteln konkurrieren.

Im Grunde eignen sich alle Teile einer Pflanze für diesen Zweck, womit sich auch die Ausbeute beim Anbau von Energiepflanzen verbesserte: Im Vergleich zu den Biokraftstoffen der ersten Generation wäre der Ertrag pro Hektar bis zu dreimal höher. Der größte Vorteil aber wäre die Verwertung von Abfällen aus all jenen Bereichen in Landwirtschaft und Industrie, wo strukturbildende Pflanzenteile anfallen.

Denn die enthalten die auf Kohlenstoff basierenden Polymere Zellulose, Hemizellulose und Lignin; man fasst sie unter dem Begriff Lignozellulose zusammen. Zellulose besteht aus miteinander verknüpften Glukosemolekülen und ist Hauptbestandteil pflanzlicher Zellwände. Könnte man diesen Vielfachzucker extrahieren, ließe sich daraus durch Gärung Ethanol herstellen, das seit einiger Zeit auch hier zu Lande Benzin zugemischt wird. Als Hemizellulosen bezeichnet man andere Vielfachzucker, die als Stütz- und Gerüstsubstanz der Pflanzen dienen. Ihre Moleküllängen variieren beträchtlich, was es erschwert, daraus ein reines Produkt wie Ethanol zu gewinnen. Das Lignin schließlich ist in den Zellwänden eingelagert und lässt sie verholzen (nach lateinisch »lignum«, Holz). Das Rückgrat dieses Polymers besteht aus Phenolgruppen, das sind aromatische, also ringförmige Kohlenstoffstrukturen, die mindestens eine Hydroxygruppe (OH-Gruppe) tragen.

Das Problem ist, dass sich die Lignozellulosen nur schwer aus ihrem Verband herausholen lassen. So sind Polysaccharide generell – anders als Einfachzucker – in Wasser nahezu unlöslich. Zellulose bildet zudem stabile kristalline Strukturen, Mikrofibrillen genannt, die von Hemizellulosen zu einem dichten Netzwerk verknüpft werden. Mikrofibrillen organisieren sich zu Fasern, die der Zellwand vor allem Zugfestigkeit verleihen. Wie bei einem Verbundwerkstoff bettet eine Matrix aus Lignin diese Fasern ein, um Druckkräfte aufzunehmen. Gerade die Mischung von diversen, miteinander verknüpften Polymeren verleiht dem Material Robustheit – auch gegenüber den Versuchen, das Lignin aufzubrechen und anderweitig zu nutzen. Erschwerend kommt hinzu, dass seine genaue chemische Zusammensetzung von Pflanze zu Pflanze variiert.

Aus diesem Grund beginnt die Kraftstoffherstellung mit dem Schreddern des Ausgangsmaterials; danach zerstören Hitze, Säure oder Ammoniak das Lignin. Nun können Enzyme alles durchdringen und die Polysaccharide freisetzen. Bislang läuft dieser Prozess inklusive der abschließenden Fermentation meist noch in Pilotanlagen – anders als bei der gut etablierten Erzeugung von Bioethanol aus Zuckerrohr oder Getreide, also aus Melasse oder Stärke. Denn die bislang verwendeten Enzyme arbeiten für den großtechnischen Einsatz nicht effizient genug.

Deshalb hoffen die Entwickler auf eine noch kaum genutzte Quelle für Biokatalysatoren: Holz verdauende Organismen. So produziert das spanische Energieunternehmen

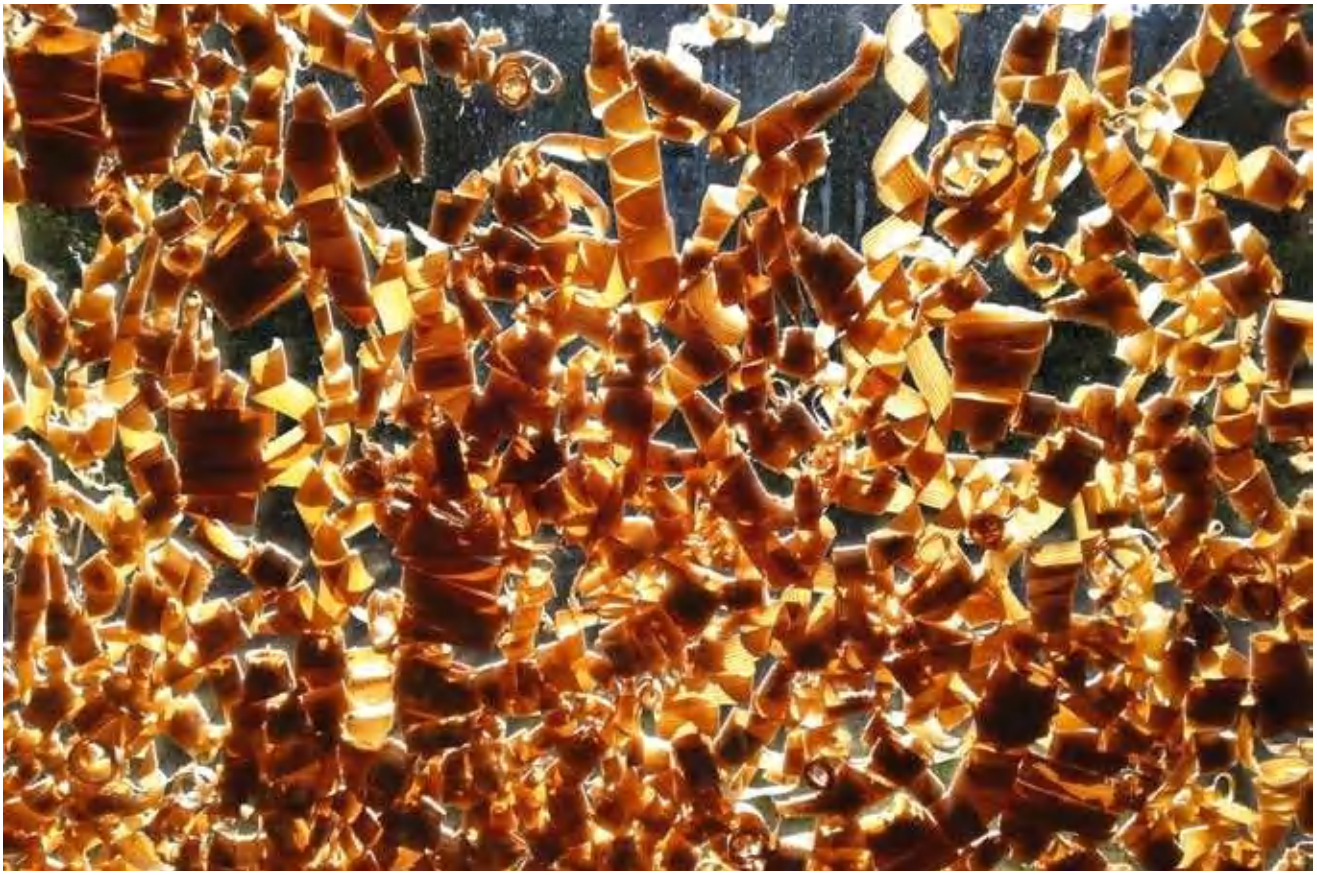
AUF EINEN BLICK

HOFFNUNG AUF DIE ZWEITE GENERATION

1 Statt **Ethanol** und andere **Kohlenwasserstoffe** aus Feldfrüchten zu gewinnen, sollen Biokraftstoffe einer neuen Generation vor allem aus pflanzlichen Abfällen entstehen.

2 Chemiker suchen deshalb nach Verfahren, **Zuckermoleküle aus Lignozellulose** zu gewinnen, dem Molekülmix, der Zellwände verholzen lässt.

3 Die dafür **erforderlichen Enzyme** sind noch teuer und wenig stabil. Lösungen versprechen jedoch **neuartige Lösungsmittel** ebenso wie die **Biotechnologie**.



PICTURE ALLIANCE / REINHARD KUNGEL

Sägeabfälle bestehen wie alle holzigen Teile von Pflanzen aus Lignozellulose. Daraus können Enzyme chemische Substanzen herauslösen, aus denen Biokraftstoffe gewonnen werden können.

Abengoa in einer Anlage in Salamanca bereits fünf Millionen Liter Ethanol pro Jahr aus Ernteresten des Maisanbaus und aus Stroh – dank eines Pilzes. Den hat die in Florida ansässige Biotechnologiefirma Dyadic gezüchtet, um preisgünstig Enzyme zu liefern, die Lignozellulose gut zersetzen. Auch Termiten sind für Forscher interessant, denn in ihrem Verdauungstrakt leben Mikroben, die Holz zersetzende Enzyme ausscheiden.

An der britischen Universität in York studiert der Pflanzenzellexperte Simon McQueen-Mason noch einen anderen Organismus: die Holzbohrassel *Limnoria quadripunctata*. Dieser kleine Meeresbewohner gilt als Schädling in den Häfen dieser Welt, zersetzt er doch Bootsanleger, Molen und anderes mehr. Das Besondere aber ist, dass sein Darmsystem keine Mikroben enthält. Die Holzbohrassel muss also selbst Enzyme absondern.

Vorbild für Chemiker: Die Holzbohrassel

Bislang haben McQueen-Mason und seine Kollegen 60 Gene dieses Organismus identifiziert, die an der Produktion so genannter Glykosidasen beteiligt sind. Das sind Enzyme, die Zellulose mit Hilfe von Wasser spalten können; Chemiker sprechen von einer Hydrolyse. Die Glykosidasen der Assel umfassen offenbar drei oder vier Gruppen, die jeweils an anderen Teilen der Zellulose angreifen. Wie das Tier aber Lignin verdaut, ist noch ungeklärt.

Dennoch hoffen die Forscher, sein Verdauungssystem in den nächsten drei Jahren vollständig aufzuklären. Um herauszufinden, welche Enzyme besonders geeignet sind, Zucker ohne weitere Vorbehandlung aus Biomasse herauszulösen, arbeiten sie mit dem dänischen Unternehmen Novozymes zusammen, das in Kalifornien ein Bioethanol-Labor unterhält. Dessen Leiter Claus Fuglsang ist überzeugt, dass die Kraftstoffe der zweiten Generation viele verschiedene Biokatalysatoren erfordern werden, und jeder muss in Kombination mit allen anderen getestet werden.

Optimierungsbedarf besteht auch bei der Vorbehandlung der Abfälle. Viel versprechend sind so genannte ionische Flüssigkeiten – Salze, die kein Lösungsmittel wie Wasser benötigen, sondern bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen in positive und negative Ionen zerfallen. Insbesondere solche Vertreter sind hier interessant, die bereits bei Raumtemperatur oder knapp darüber flüssig werden. Sie können Lignin gut durchdringen und verholzte Biomasse auf diese Weise in einen Brei verwandeln. Zwar versteht man noch nicht genau, wie sie das bewerkstelligen, aber die Arbeitsgruppe um den Chemiker Brad Holmes vom Joint BioEnergy

Institute im kalifornischen Emeryville setzt ionische Flüssigkeiten bereits ein, um kristalline Zellulose aufzulösen und dann als einfacher handhabbaren, amorphen Festkörper erstarren zu lassen.

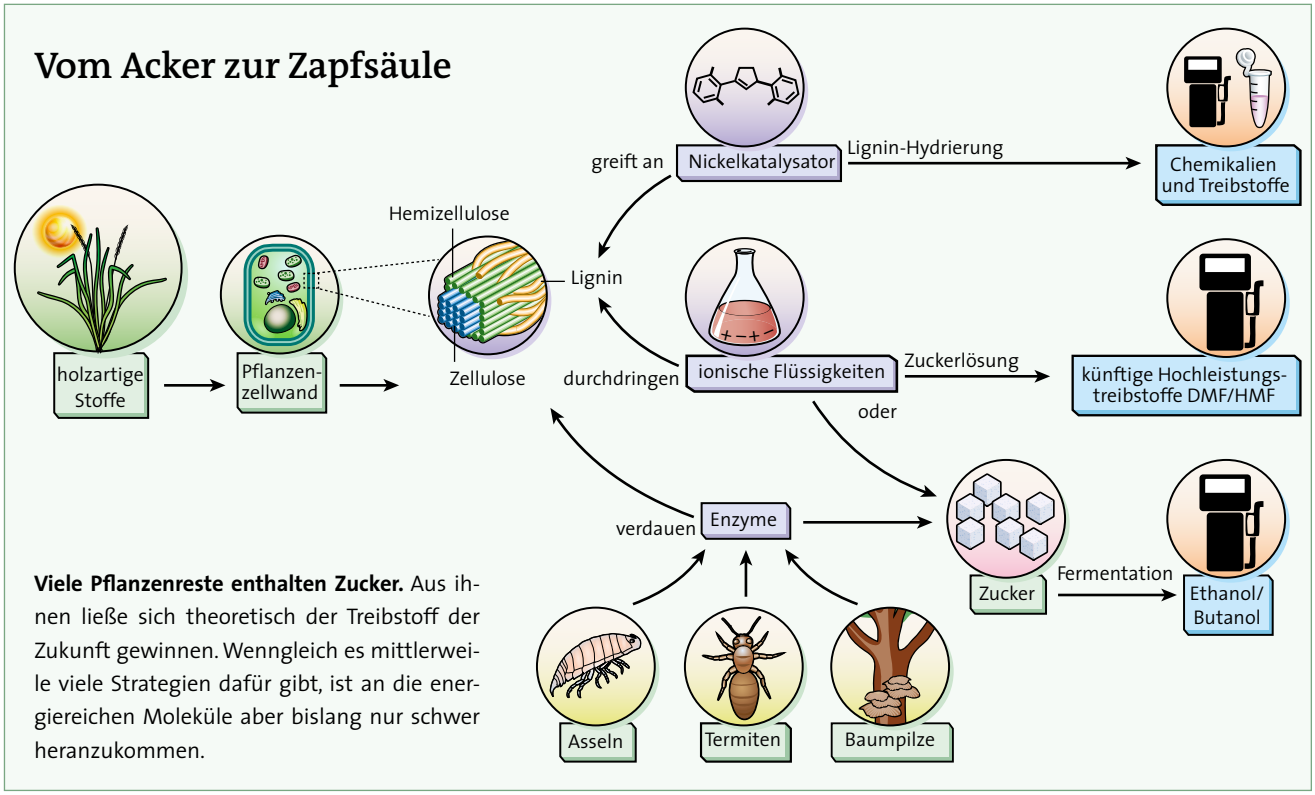
Zuckerpolymere daraus zu gewinnen, erweist sich aber als schwierig. Ein Teil der teuren Lösungsmittel geht ohnehin verloren, jeder Rest davon in der Zuckermischung blockiert die Enzyme im nachfolgenden Gärungsschritt. Holmes' Gruppe untersucht derzeit, ob es mit Hilfe von Borsäure möglich ist, die Zucker zu extrahieren, ohne die ionischen Flüssigkeiten zu zerstören. Doch der Chemiker schätzt, dass noch mindestens zehn Jahre vergehen werden, bis die Technik ausgereift ist.

Die Alternative: Ionische Flüssigkeiten

Angesichts der enormen Menge an teuren Enzymen, die eine kommerzielle Produktion von Biokraftstoffen benötigen würde, nutzt Ronald Raines von der University of Wisconsin-Madison gleich einen ausschließlich chemischen Ansatz. Seine Forschungsgruppe hat ein Verfahren entwickelt, das auf einer ionischen Flüssigkeit aus N,N-Dimethylacetamid und Lithiumchlorid basiert. Sie löst Zellulose auf, ohne deren chemische Struktur zu verändern. Damit will die Gruppe Biokraftstoff bei Temperaturen unter 140 Grad Celsius herstellen. Die Forscher zielen dabei nicht auf Ethanol, sondern auf die Produktion von Furanen, einer Klasse aromatischer Moleküle. 2,5-Dimethylfuran (DMF) hat eine 40 Prozent höhere Energiedichte als Ethanol und wäre somit als Beimengung zu Benzin besser geeignet.

Erste Tests verliefen viel versprechend: DMF verbrennt ähnlich wie der konventionelle Kraftstoff, die dabei freigesetzten Partikel haben auch eine vergleichbare Größe zu herkömmlichen Emissionen. Bevor es als Biokraftstoff auf den Markt darf, muss DMF aber nicht nur Studien bezüglich der technischen Implikationen bestehen. Auch Sicherheitsaspekte bedürfen noch eingehender Klärung, denn DMF ist bekanntermaßen giftig – es greift das Nervensystem an.

Die Chemiker John Hartwig und Alexey Sergeev von der University of Illinois in Urbana-Champaign entwickeln ebenfalls eine Alternative zu Enzymen. Sie berichteten kürzlich von einem Nickelkatalysator, der Sauerstoffatome selektiv aus Ligninverbindungen herauslöst, ohne das Molekül ganz zu zerstören. Der Vorteil: Je weniger Sauerstoff Lignin besitzt, desto besser eignet es sich als Basis für Treibstoffe. Der Katalysator bricht Kohlenstoff-Sauerstoff-Bindungen von organischen Gruppen auf und ersetzt dort Sauerstoff- durch Wasserstoffatome. Konventionell bewirkt man das Gleiche bislang mit hohen Temperaturen und Drücken, doch besetzt der Wasserstoff oft die falschen Stellen – es entsteht eine Mischung von Produkten, die nicht optimal ist. Der Nickelkatalysator schafft aber noch nicht völlige Abhilfe, denn er liegt bislang in gelöster Form vor, lässt sich also nur schwer von den gleichfalls flüssigen Reaktionsprodukten abtrennen. Hartwig entwickelt deshalb eine Feststoffversion, über oder durch die das verflüssigte Lignin fließen soll. Zudem erfolgten alle Tests bislang an Modellsubstanzen, nicht an natürlichem, aus Abfällen gewonnenem Lignin – vor Überraschungen sind die Wissenschaftler also nicht gefeit. Dennoch sind



Viele Pflanzenreste enthalten Zucker. Aus ihnen ließe sich theoretisch der Treibstoff der Zukunft gewinnen. Wenngleich es mittlerweile viele Strategien dafür gibt, ist an die energiereichen Moleküle aber bislang nur schwer heranzukommen.

SANDERSON, K.: A CHEWY PROBLEM. IN: NATURE 474, S. 12–14, 2011, SEITE 13

SIMON CRAGG UND GRAHAM MALYON, UNIVERSITY OF PORTSMOUTH

Der Meeresbewohner *Limnoria quadripunctata*, eine Holzbohrassel, sondert ein Verdauungsenzym ab, welches Hafenanlagen aus Holz ruinieren kann; es könnte aber auch nützlich sein, um Biokraftstoffe herzustellen. Forscher versuchen deshalb, die beim Holzabbau aktiven Gene zu ermitteln und das Verdauungssystem des Tiers zu verstehen.

sie optimistisch und suchen obendrein nach Möglichkeiten, den Wasserstoff durch Elektrolyse oder aus Biomasse zu gewinnen, um das Verfahren nachhaltiger zu gestalten.

Angesichts solcher Hürden haben enzymgestützte Verfahren immer noch die Nase vorn. So plant die italienische Firma Mossi & Ghisolfi, in diesem Jahr die weltweit größte Fabrik zur Herstellung von Ethanol aus Zellulose in Betrieb zu nehmen. Mit den Biokatalysatoren von Novozymes will man gut 50 Millionen Liter pro Jahr herstellen. Das ist doppelt so viel, wie die amerikanische Umweltschutzagentur EPA als Beimischung zu Kraftstoffen für das Jahr 2011 anpeilte.

Bei solchen Größenordnungen gilt es weit mehr zu beachten als die chemischen Prozesse in den Reaktoren. Beispielsweise geht Katherine Smart, Leiterin von LACE – Lignocellulosic Conversion to Ethanol, einem Gemeinschaftsprojekt von Industrie und Wissenschaft der britischen University of Nottingham – wirtschaftlichen, sozialen und ethischen Fragestellungen nach, die sich bei den Biotreibstoffen der zweiten Generation ergeben. LACE arbeitet dabei unter anderem mit dem Ölkonzern BP, British Sugar sowie dem holländischen Chemieriesen DSM zusammen. Smart zufolge fehlt es an Investoren und klaren gesetzlichen Vorgaben. Das größte Problem aber stelle der Massentransport von Biomasse, Enzymen sowie anderen Stoffen zur Produktionsanlage dar. Es könnte sogar notwendig sein, Biokatalysatoren direkt auf dem Firmengelände herzustellen. Fuglsang von Novozymes schlägt in die gleiche Kerbe. Kleine Produktionsanlagen sollten seines Erachtens dort stehen, wo Biomasse anfällt. Am Ende, so vermutet er, werde sich die gesamte Infrastruktur für Bioethanol, angefangen von der Herstellung bis zur Verteilung, vollkommen von jener unterscheiden, die für Erdöl entwickelt wurde. ~

DIE AUTORIN

Die promovierte Chemikerin **Katharine Sanderson** arbeitete lange als Reporterin im Team der Zeitschrift »Nature«. Inzwischen ist sie freiberuflich als Wissenschaftsjournalistin tätig und lebt in Toulouse, Frankreich.

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1139695**

© Nature Publishing Group
www.nature.com
Nature 474, S. 12–14, 23. Juni 2011

Auf der Suche nach »grünem« Benzin

Ein aus Biomasse fabrizierter Treibstoff muss konzentrierte Energie enthalten und billig sein. Sonst kann er mit herkömmlichem Benzin nicht konkurrieren.

Von Neil Savage

Ein einziges Wort fasst zusammen, wie ein künftiger Biokraftstoff beschaffen sein muss: wie Benzin. »Wir wollen die gleichen Moleküle wie in Benzin, Kerosin und Diesel herstellen«, sagt George Huber, ein Chemieingenieur an der University of Massachusetts-Amherst, der Verfahren zur Umwandlung von pflanzlichem Material in Kraftstoffe entwickelt. Ein idealer Biokraftstoff soll sich wie Benzin in die heutige Infrastruktur einfügen und jedes Fahr- oder Flugzeug ans gewünschte Ziel bringen.

Lange konzentrierte sich die Biokraftstoffindustrie auf Ethanol, doch dessen Energiedichte ist bescheiden: Mit einem Liter Ethanol schafft ein Auto nur rund 70 Prozent der Strecke, die ein Liter Benzin garantiert, und für schwere Lastwagen und Flugzeuge liefert Ethanol schlicht zu wenig Leistung. Außerdem vermischt es sich mit Wasser aus der Umgebung und wird verdünnt. Da Ethanol obendrein korrodierend wirkt, lässt es sich nicht ohne Weiteres in heutige Maschinen einspeisen oder billig durch vorhandene Pipelines befördern.

Darum versuchen Forscher aus Biomasse Alkohole zu gewinnen, die komplexer sind als Ethanol, sowie Kohlenwasserstoffgemische, die wie Erdöl aus verschieden langen Molekülen bestehen. Solche biologisch-chemischen Prozesse sollen Substanzen ergeben, die entweder direkt als Treibstoff dienen oder in bestehenden Raffinerien weiterverarbeitet werden können. Dabei will man möglichst viel Biomasse nutzen – nicht nur die einfachen Kohlenwasserstoffe, die sich aus Zuckerrohr oder Maiskörnern gewinnen lassen, sondern auch Zellulose und Lignin aus Maisstängeln, Holz und Präriegras *(Panicum virgatum)*, die schwieriger aufzuspalten sind.

Ein »höherer Alkohol« – ein Molekül mit mehr Kohlenstoff- und Wasserstoffatomen als Ethanol – kommt dem Ideal schon näher. Ethanol enthält zwei Kohlenstoffatome, die mit fünf Wasserstoffatomen verbunden sind, sowie eine Hydroxylgruppe. Die nutzbare Energie steckt in den Kohlenstoff-Wasserstoff-Verbindungen; bei der Verbrennung brechen sie auf und setzen Energie frei. Durch Hinzufügen von zwei weiteren Kohlenstoff- und vier Wasserstoffatomen entsteht Butanol; es verursacht weniger Korrosion und bringt mehr Leistung. Mit seinen vier Kohlenstoffen hat Butanol rund 90 Prozent der Energie von Benzin, einem Molekülgemisch mit fünf bis acht Kohlenstoffatomen. Diesel und Kerosin besteht aus Molekülen mit 9 bis 16 Kohlenstoffatomen.

Größere Alkohole

Derzeit wird dem Benzin oft Ethanol beigemischt, um das Klopfen – vorzeitiges Zünden – zu verhindern. Heutige Benzingemische enthalten meist maximal 10 Prozent Ethanol, aber ein Gemisch mit 50 bis 70 Prozent Butanol wäre durchaus vorstellbar. Manche Befürworter meinen sogar, unveränderte Automotoren könnten mit purem Butanol laufen. »Mit diesen längeren Molekülen können wir viel mehr erneuerbare Energie in den Kraftstoff packen«, sagt Michelle Chang, Chemikerin an der University of California in Berkeley. Sie hat Mikroben dazu gebracht, Butanol zu produzieren. Letztlich könnte Butanol sogar billiger herzustellen sein als Ethanol. Wenn ein Stück Hefe den beispielsweise aus Mais gewonnenen Zucker umsetzt, entsteht ein Gemisch aus Ethanol und Wasser. Letzteres muss durch Erhitzen entfernt werden, was zusätzliche Energie kostet. Da sich Butanol und Wasser nicht mischen, lassen sie sich mit weniger Energieaufwand trennen.

Wie gewinnt man überhaupt genügend Alkohol? Hefestämme werden seit Jahrtausenden gezüchtet, um alkoholische Getränke herzustellen, indem sie pflanzliche Glukose in

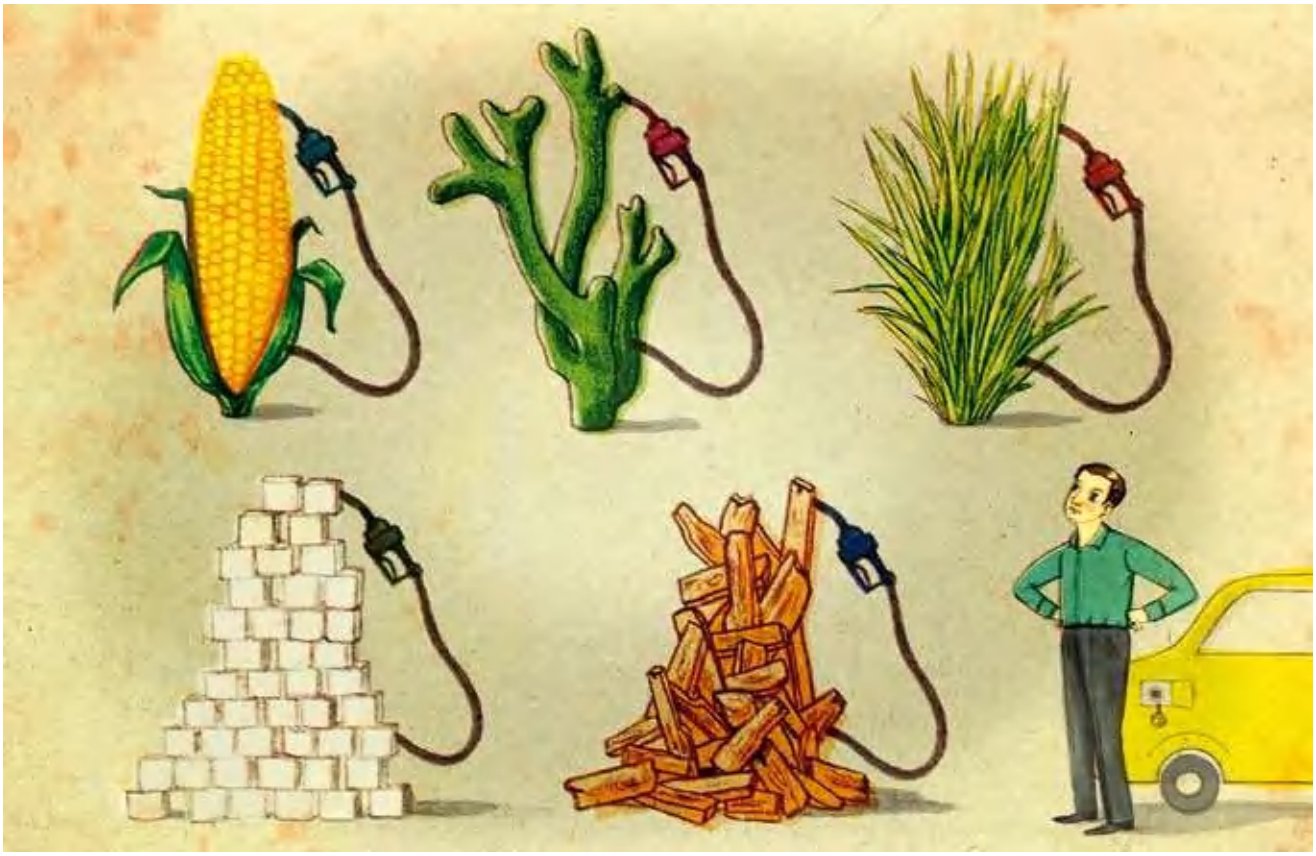
AUF EINEN BLICK

DER IDEALE TREIBSTOFF

1 Künftige **Biokraftstoffe** müssen im Vergleich mit fossilem, aus Erdöl gewonnenem Benzin bestehen.

2 **Ethanol und andere Alkohole** können es wegen mangelnder Energiedichte nicht mit Benzin aufnehmen.

3 Darum versuchen Forscher, mit chemischen und biotechnischen Verfahren aus Biomasse die für Benzin typischen **Kohlenwasserstoffe** zu synthetisieren.



JONATHAN BURTON

Der Autofahrer erwartet, an der Zapfsäule einen Biosprit vorzufinden, der so viel leistet wie herkömmliches Benzin – nur welchen?

Ethanol umwandeln. Durch Genmanipulation lässt sich die Ethanolausbeute ohne Weiteres steigern. Zwar gibt es auch natürliche Organismen, die Butanol und höhere Alkohole erzeugen, doch die meisten liefern nur winzige Mengen, sagt Chang. »Die Frage ist, wie man dieselbe Ausbeute wie bei Ethanol gewinnt. Davon ist man noch weit entfernt.«

Immerhin hat Chang kürzlich ein Verfahren entdeckt, das die Butanolproduktion verzehnfacht – zumindest im Labor. Sie entnahm verschiedenen Organismen Gene und pflanzte sie in das Darmbakterium *Escherichia coli* ein. Einige der Erbfaktoren stammen aus dem Bakterium *Clostridium*, das Butanol erzeugt. Allerdings, so Chang, ist *Clostridium* mehr auf das eigene Überleben programmiert als auf das Produzieren großer Butanolmengen. Sobald die Zelle feststellt, dass es zu viel davon gibt, beginnen dieselben Enzyme, die das Butanol hergestellt haben, es wieder abzubauen. Ähnliche Versuche anderer Forscher lieferten darum bloß ein halbes Gramm Butanol pro Liter Glukoselösung. Also mischte Chang Gene von zwei anderen Bakterien bei, *Treponema denticola* und *Ralstonia eutropha*. Sie produzieren etwas abweichende Versionen der Enzyme, welche die Fermentation steuern – und diese Enzyme bauen Butanol weniger stark ab.

Die Manipulation ist bei längeren Kohlenstoffketten schwieriger. Je größer das Molekül, desto mehr Schritte erfordert seine Herstellung – und jeder Schritt gibt der Zelle die Chance, die Produktion wieder in eine natürlichere Richtung umzuleiten. »Um gut zu produzieren, müssen die Zellen gesund sein«, erklärt Shota Atsumi, Chemiker an der University of California in Davis. »Doch wenn wir manche Herstellungsschritte immer wieder ausschalten, werden die Zellen krank.« Auch Atsumi hat Gene anderer Organismen in *E. coli* eingefügt, damit die Bakterien Butanol produzieren sowie Pentanol, einen Alkohol mit fünf Kohlenstoffatomen.

Atsumis Mitarbeiter James Liao, ein Chemieingenieur an der University of California in Los Angeles, stellte kürzlich einen höheren Alkohol her, indem er zwei Verbesserungen gegenüber der Ethanolproduktion aus Mais kombinierte. Er ging von einem *Clostridium*-Typ aus, der Zellulose zu verdauen vermag und somit die verfügbare Biomasse besser nutzt. Statt *E. coli* zu manipulieren, veränderte Liao einen Genabschnitt in *Clostridium* so, dass das Bakterium Isobutanol produzierte. Isobutanol hat dieselbe chemische Summenformel wie Butanol, aber eine andere, verzweigte Struktur; dadurch leistet es im Verbrennungsmotor mehr und lässt sich leichter zu anderen Substanzen synthetisieren.

Mehrere Firmen möchten die Produktion von Butanol oder Isobutanol aus Biomasse kommerziell nutzen. Im Dezember 2010 verkaufte das Biotechnikunternehmen Green Biologics in Abingdon, Großbritannien, sein auf einem *Clostridium*-Stamm beruhendes Verfahren an zwei chinesische Biochemiefirmen. Butamax Advanced Biofuels, ein Joint Venture zwischen dem Ölkonzern BP und dem Chemiegigan-

MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de

Unser Online-Dossier »Energie«
finden Sie unter

www.spektrum.de/energie

ten DuPont, hat eine Versuchsanlage im britischen Hull eröffnet und hofft, 2013 auf den Markt zu gehen. Gevo, eine Firma für fortgeschrittene Biokraftstoffe in Englewood (Colorado), baut eine Ethanolfabrik in Minnesota mit dem Ziel um, von 2012 an jährlich rund 68 Millionen Liter Isobutanol zu produzieren. Wie Ethanol wird Butanol vermutlich als Benzinbeimischung eingesetzt werden.

Atsumi meint freilich, dafür müsse die Isobutanolausbeute erst einmal um mehrere Größenordnungen steigen. Er hält nichts davon, mit genmanipulierten Mikroben noch höhere Alkohole herzustellen, denn es sei ziemlich einfach, Isobutanol auf konventionelle Weise in andere nützliche Moleküle umzuwandeln. »Isobutanol ist bereits ein großartiger Biokraftstoff«, sagt er; Alkohole mit vier oder fünf Kohlenstoffen seien gut genug für die Treibstoffindustrie. Aus Isobutanol wird beispielsweise durch Abspalten von Wasser Isobuten, aus dem sich wiederum alles Mögliche von Benzin bis zum Düsentreibstoff machen lässt.

Kohlenwasserstoffe taugen mehr

Doch kein Alkohol wird wohl Benzin vollständig ersetzen können, wenn es gilt, das vorhandene System zur Aufbewahrung und Verteilung des Kraftstoffs zu nutzen. »Mit Alkohol, insbesondere mit Ethanol, steigt der Verbrauch gewaltig«, sagt John Regalbuto von der University of Illinois in Chicago. Alkohol ist »einfach nicht so energiedicht wie Kohlenwasserstoffe«, meint der Chemieingenieur, der früher das Katalyse- und Biokatalyseprogramm der amerikanischen National Science Foundation leitete; es fördert Projekte zur Umwandlung von Biomasse in Kraftstoff und andere nützliche Substanzen.

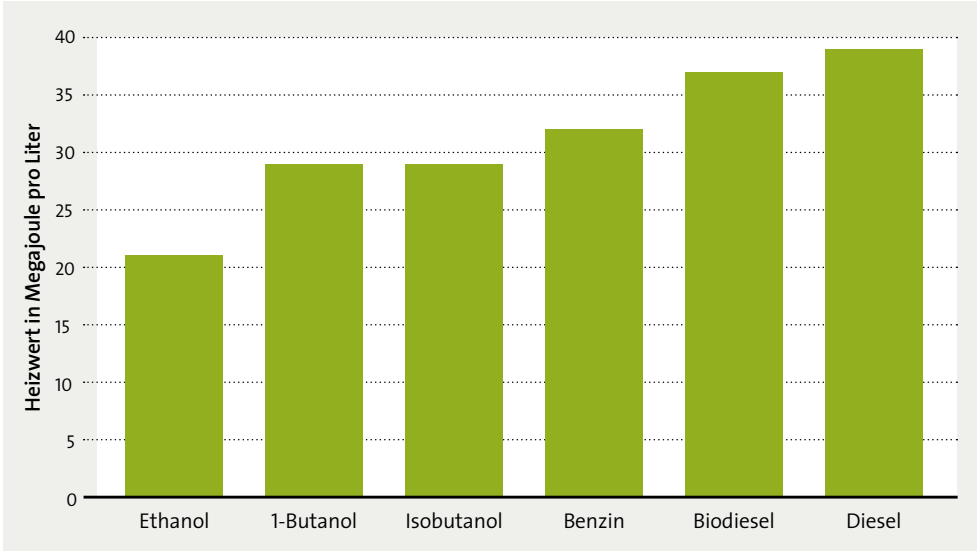
Je ähnlicher die von Mikroben produzierten Moleküle den in heutigen Motoren verbrannten Verbindungen werden, desto besser passen sie in die bereits existierende Infrastruktur. Regalbuto zitiert gern das Motto von LS9, einer Biotechnikfirma in South San Francisco (Kalifornien), die Mikroben dazu bringt, Kohlenwasserstoffketten zu produzieren: »Der beste Ersatz für Öl ist Öl.«

Unternehmen wie LS9 verändern mittels synthetischer Biologie den Fermentationsprozess so, dass daraus nicht Alkohole hervorgehen, sondern Kohlenwasserstoffe. Die Forscher identifizierten Gene, die Zyanobakterien befähigen, Alkane zu erzeugen – Moleküle, die nur Kohlenstoff- und Wasserstoffatome enthalten. Die kleinsten Alkane sind die brennbaren Gase Methan, Ethan, Propan und Butan, während Benzin und Diesel vorwiegend aus Alkanen mit längeren Ketten von Kohlenstoffatomen bestehen. Bei LS9 läuft seit mehr als zwei Jahren eine Pilotanlage; im Dezember 2010 gab die Firma bekannt, sie habe von Investoren 30 Millionen Dollar erhalten, um die kommerzielle Produktion vorzubereiten.

Chemie statt Biotechnik

Eine andere Methode, um aus Pflanzen Kohlenwasserstoffe zu gewinnen, geht von Ölen aus, die etwa von Ölpalmen oder Sojabohnen stammen. Ein chemischer Vorgang namens Transesterifizierung wandelt diese Öle in Biodiesel um. Doch wegen des großen Bodenbedarfs für den Anbau der Pflanzen glaubt Regalbuto nicht, dass Biodiesel die Kraftstoffnachfrage befriedigen wird. Zwar wird eifrig an Algen geforscht, die Öl zur Umwandlung in Biodiesel liefern sollen, aber bisher bleiben die Ergebnisse weit hinter den enthusiastischen Prognosen zurück.

Doch nicht jeder Ansatz zur Erzeugung von Kohlenwasserstoffen beruht auf Mikroben, die Biomasse verdauen. James Dumesic, Chemiker und Biologe an der University of Wisconsin-Madison, verwendet einen vielstufigen chemi-



NATURE NACH: HAN, L. ET AL.: BIOFUELS – BIOMOLECULAR ENGINEERING FUNDAMENTALS AND ADVANCES. IN: ANNUAL REVIEW OF CHEMICAL AND BIOMOLECULAR ENGINEERING 1, S. 19–36, 2010

Die Energiedichte unterschiedlicher Biokraftstoffe kann sich nicht mit der von herkömmlichen Erdölprodukten messen.

MIT FRDL. GEN. VON JOUNG-MO CHO, UNIVERSITY OF MASSACHUSETTS AMHERST

Die Pyrolyse verwandelt Holzstückchen (links) durch sekundenlanges Erhitzen auf über 400 Grad Celsius bei Zugabe eines Katalysators (Mitte) in »Bioöl« (rechts).

schen Prozess. Er verwandelt Biomasse in Gamma-Valerolacton, kurz GVL. Die klare Flüssigkeit lässt sich wie Ethanol dem Benzin beimischen. Und GVL hat einen wichtigen Vorzug: Man kann es zu einem Kohlenwasserstoff verarbeiten.

Um GVL zu fabrizieren, lässt Dumesic Schwefelsäure auf die Zellulose von Maisstängeln und -blättern oder Holz einwirken. Hingegen wendet man bei der Fermentation oft Enzyme an, um die Zellulose in den einfacheren, für Mikroben verdaulichen Zucker Glukose aufzuspalten. »Wir überspringen den Zucker einfach«, sagt Dumesic; außerdem ist Schwefelsäure viel billiger als Enzyme.

Dieser Schritt liefert gleiche Mengen von Ameisensäure und Lävulinsäure. Ein Katalysator aus Ruthenium und Kohlenstoff verwandelt die Lävulinsäure in GVL, das 97 Prozent der in der ursprünglichen Biomasse steckenden Energie enthält. Die Katalyse braucht kaum eine Stunde, während eine Fermentation Tage dauern würde. GVL lässt sich durch übliche Pipelines oder Tanklaster zu einer Raffinerie schaffen. Dort entsteht daraus durch Erhitzen unter hohem Druck in Gegenwart eines Zeolithkatalysators, wie er üblicherweise beim Erdölcracken eingesetzt wird, Buten plus Kohlendioxid. Die Butenmoleküle setzen sich mit Hilfe eines anderen gewöhnlichen Katalysators zu längeren Kohlenwasserstoffketten zusammen; das ergibt Diesel oder Kerosin.

Ein Problem dabei ist, dass der Schwefel der Säure den Ruthenium-Kohlenstoff-Katalysator deaktivieren kann. Darum ist Dumesic zu einem – teureren – Ruthenium-Rhenium-Katalysator übergegangen. Derzeit versucht er, Ruthenium durch ein billigeres Metall zu ersetzen.

Manche Forscher versuchen es mit gängigen Verfahren wie Vergasung und Pyrolyse. Bei der Vergasung werden kohlenstoffhaltige Substanzen unter Sauerstoff stark erhitzt. Das entstehende Gasgemisch kann als Treibstoff verbrannt oder durch die bewährte Fischer-Tropsch-Synthese in flüssigen Kraftstoff umgewandelt werden. Die Pyrolyse funktioniert ähnlich: Die Biomasse wird ohne Sauerstoff ein paar Sekunden lang auf 400 bis 600 Grad Celsius erhitzt und dann so rasch abgekühlt, dass flüssiges Bioöl entsteht. Wie Rohöl ist Bioöl ein Gemisch, das sich zu Kraftstoffen raffinieren lässt.

Bei dieser Veredelung wird dem Kohlenstoff im Öl viel Wasserstoff zugesetzt. Das kann mehr kosten als das Bioöl selbst, betont der eingangs erwähnte George Huber, der bei Dumesic studiert hat. Huber hat einen Pyrolyseprozess entwickelt, der durch Beigabe eines Katalysators nicht beim Bioöl Halt macht. Die Biomasse wird gemahlen und rasch erhitzt; die entstehenden Dämpfe strömen durch Zeolithe und werden dabei in Benzol, Toluol und Xylol umgewandelt. Ein Gemisch dieser aromatischen Kohlenwasserstoffe ergibt einen Kraftstoff, der für Rennwagen taugt. Der ganze Vorgang dauert nur Minuten. »Er wird wohl deutlich billiger sein als Vergasung oder Fermentierung«, meint Huber. Seine Universität hat die Lizenz für diese Technik an die New Yorker Start-up-Firma Anellotech vergeben, die der Chemieingenieur mitgegründet hat. Solange Biomasse billig bleibt, so Huber, kann der auf diese Weise gewonnene Kraftstoff durchaus mit derzeitigen Benzinpreisen konkurrieren.

Technologiemix

Huber zufolge wird sich für Biokraftstoffe künftig ein Gemisch von Technologien etablieren. »Die Bioraffinerie der Zukunft wird der heutigen Ölraffinerie ähneln«, sagt er. Kraftstoff wird weiterhin aus den gleichen Verbindungen bestehen wie heute. Es gibt keinen Grund, eine neue Flüssigkeit zu erfinden, meint George Church, Genetiker an der Harvard Medical School in Boston (Massachusetts). Benzin »ist wie eine Batterie mit 100-fach höherer Energiedichte«, sagt Church, dessen Forschung in synthetischer Biologie zur Technik bei LS9 und anderen Biospritfirmen beigetragen hat.

Regalbuto erwartet, dass Biokraftstoff auf Kohlenwasserstoffbasis bald ganz selbstverständlich zum Alltag gehören wird. »In fünf bis sieben Jahren werden wir grünes Benzin tanken«, sagt er, »und zwar ohne viel davon zu merken.« Später werden herkömmliche, flüssigen Kraftstoff verbrennende Autos von batteriegetriebenen Fahrzeugen abgelöst werden, die den Strom aus Kernkraft und erneuerbarer Energie beziehen. Schwere Motoren für Schiffe, Flugzeuge und Lastwagen werden weiterhin mit Biokraftstoff laufen. Diese Strategie, so Regalbuto, wird die Wirtschaft von Ölimporten unabhängig machen: »Mit Strom für Autos und Biotreibstoff für schwere Vehikel sind wir in zwei Jahrzehnten autark.« ~

DER AUTOR

Neil Savage ist ein amerikanischer Wissenschaftsjournalist. Er lebt in Lowell (US-Bundesstaat Massachusetts).

WEBLINKS

http://nature.com/f8yNIX
Zahlreiche Artikelhinweise auf biotechnische Forschung zur Produktion von Biokraftstoffen (englisch)

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1139696**

© Nature Publishing Group
www.nature.com
Nature 474, S. 9–11, 23. Juni 2011

Selbstheilende Materialien

Wenn Werkstoffe versagen, müssen sie kostspielig ausgetauscht werden. Wäre es da nicht besser, sie könnten sich wie biologische Systeme selbst reparieren? Bei Kunststoffen ist das tatsächlich möglich und im Labor schon mit den verschiedensten Methoden gelungen.

Von Scott R. White und Benjamin J. Blaiszik

Nichts hält für die Ewigkeit. Jeder von Menschenhand geschaffene Gegenstand, sei es ein Auto oder ein Brückenpfeiler, hat nur eine begrenzte Lebensdauer und muss, damit er nicht frühzeitig seinen Dienst versagt, regelmäßig inspiziert und bei Bedarf repariert werden – meist durch Austausch beschädigter Teile.

Biologische Systeme lösen das Problem eleganter: Sie erkennen innere oder äußere Schäden im Allgemeinen automatisch und beheben sie ohne großen Aufwand durch Selbstheilung. Damit wecken sie den Neid und den Nachahmungstrieb der Werkstoffkundler. Unsere eigene Forschergruppe ist nur eine von vielen weltweit, die Polymeren, Verbundwerkstoffen und anderen synthetischen Materialien die Fähigkeit verleihen möchten, sich selbst zu reparieren, wenn sie gerissen oder gebrochen sind. Allein mit Material, das sie bereits enthalten, sollen sie ihre ursprüngliche Funktionalität wiederherstellen können. Dieser Ansatz eröffnet ganz neue Möglichkeiten, Produkte und Komponenten sicherer und langlebiger zu gestalten.

Wie läuft die Selbstheilung bei biologischen Systemen ab? An einer verletzten Stelle entzündet sich das Gewebe, und ausgetretenes Blut gerinnt. Dann beginnen die benachbarten Zellen zu wuchern. Dabei erzeugen sie eine Gerüstsubstanz (»Matrix«) für die eigentliche Regeneration (»Reparatur«). Zum Schluss wächst durch Umbau dieser Matrix das neue Gewebe nach und füllt die Wunde aus. Der gesamte Vorgang kann sich je nach Schwere der Verletzung über längere Zeiträume hinziehen – von Wochen über Monate bis teilweise sogar Jahre.

Die bisher erprobten künstlichen Systeme ahmen diese Ereignisfolge nach, allerdings in vereinfachter und verkürzter Form. Auch hier setzt eine Schädigung den Selbstheilungsprozess in Gang. Bestimmte Substanzen bewegen sich daraufhin rasch zum Riss oder Bruch, wo sie miteinander reagieren und eine Haftverbindung zwischen den Bruchflächen bilden. Meist besteht der heilende Wirkstoff aus zwei verschiedenen flüssigen Komponenten, die nach dem Mischen erhärten. Schließlich folgt ein chemischer Ausheilungsvorgang analog zum Matrixumbau; er kann je nach System unterschiedlich lange dauern, ist jedoch meist nach wenigen Stunden bis maximal ein paar Tagen abgeschlossen. Die Geschwindigkeit der Reparatur lässt sich über die Temperatur und über die Reaktivität der Komponenten steuern. Sie sollte in jedem Fall größer sein als die Schädigungsrate, die ihrerseits stark von äußeren Faktoren wie der Dehnungsgeschwindigkeit oder der Häufigkeit und Stärke der Beanspruchung abhängt.

Die Erforschung selbstheilender Werkstoffe ist ein relativ neues Gebiet, das sich in den vergangenen zehn Jahren rasant entwickelt hat. Obwohl sich theoretisch jedes Material selbst zu reparieren vermag, sind die Erfolge bei Polymeren und Faserverbundstoffen größer als bei Keramiken, Metallen und anderen Materialien.

Unabhängig von der Werkstoffklasse lassen sich die Mechanismen der Selbstheilung grob in drei Gruppen einteilen: kapselbasiert, vaskulär und intrinsisch. Der Hauptunterschied besteht in der Methode, die Reaktion der Heilsubstanz erst dann

AUF EINEN BLICK

ERNEUERUNG AUS EIGENER KRAFT

1 Die Natur macht es vor: **Biologische Systeme** können Schäden oft selbst beheben. Materialforscher versuchen nun, **Werkstoffen** dieselbe Fähigkeit zu verleihen. Dazu versetzen sie diese mit Substanzen, die etwa Bruchflächen wieder fest miteinander verbinden.

2 Bei solchen Heilmitteln handelt es sich in der Regel um Flüssigkeiten, die beispielsweise in **Kapseln** oder **Kanälen** im Inneren des Werkstoffs untergebracht werden. Bei einer Beschädigung zerbrechen die Behältnisse, wodurch die **Reparaturstoffe** austreten. Sie füllen dann den Riss oder Spalt und reagieren dort miteinander oder mit dem Werkstoff zu einer festen Masse.

3 Forscher können manche Materialien auch mit der **intrinsischen Fähigkeit zur Selbstheilung** ausstatten. Zur Regeneration nutzen solche Systeme **reversible Bindungen** wie Wasserstoffbrücken oder ionische Wechselwirkungen, die nach einem Bruch beim Erwärmen selbsttätig neue Verknüpfungen bilden.

4 Versuchssysteme im Labor konnten sich nach Beschädigung bereits vollständig wiederherstellen. Unter bestimmten Bedingungen gelang die **Selbstreparatur** sogar mehrfach hintereinander an derselben Stelle. Der Weg zu praktischen Anwendungen scheint nicht mehr weit.

zu starten, wenn eine Schädigung vorliegt. Es gibt aber auch Abweichungen darin, wie schwer der zu behebende Defekt höchstens sein darf, wie schnell die Heilung abläuft und wie oft sie am selben Ort hintereinander stattfinden kann. Insofern hat jeder Ansatz seine speziellen Vor- und Nachteile.

Bei den Kapselsystemen ist die Heilsubstanz in kugelförmigen Membranbläschen untergebracht, die im Werkstoff verteilt sind und bei einer Beschädigung zerreißen. Der freigesetzte Inhalt behebt den Defekt an Ort und Stelle. Danach ist das Reagens allerdings aufgebraucht, weshalb nur eine einmalige, örtlich begrenzte Selbstreparatur möglich ist.

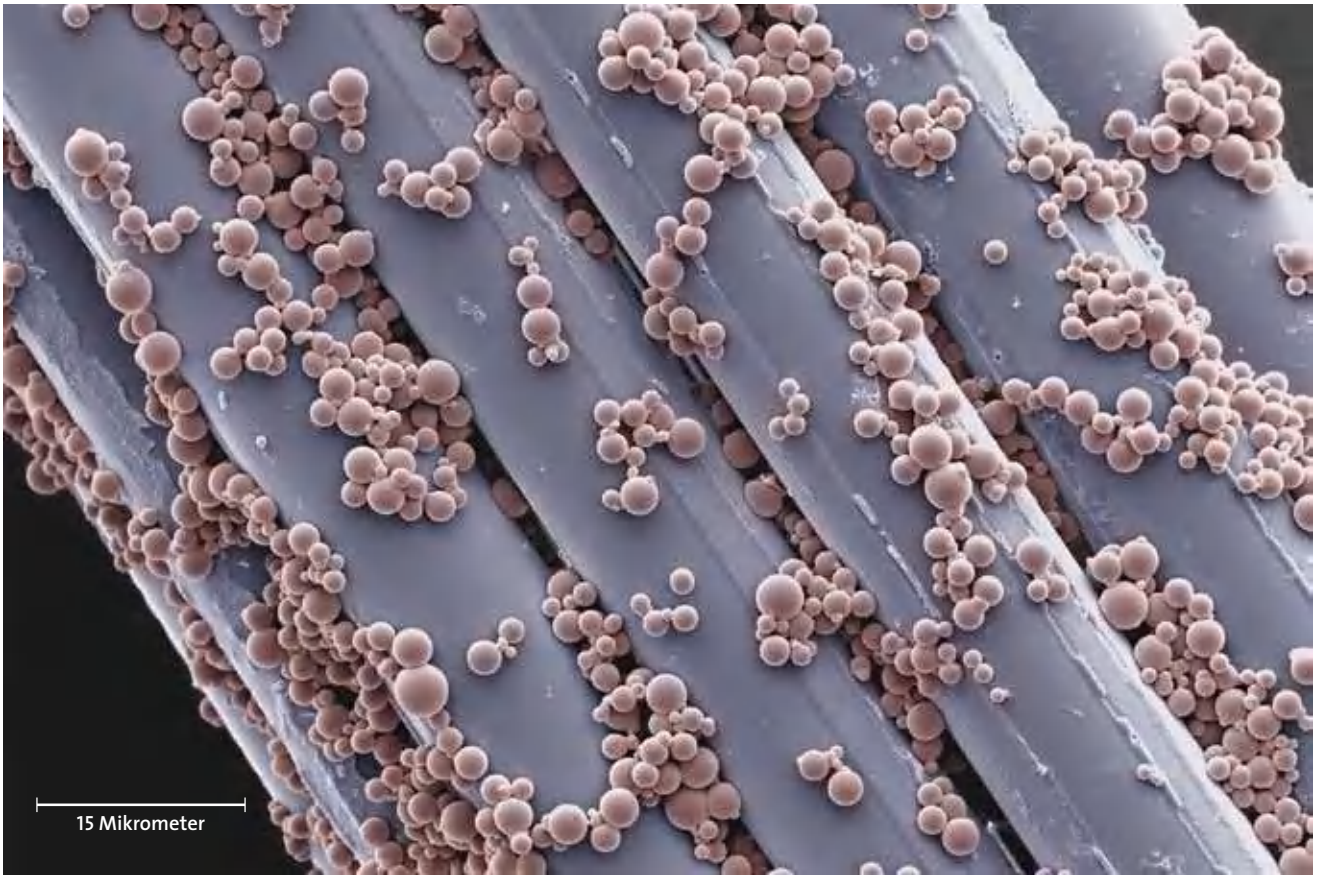
Bei vaskulären Werkstoffen befindet sich das Heilmittel in einem Kapillarnetz, das aus parallelen Einzelröhren, Schichten miteinander verbundener Röhren oder dreidimensionalen Kanalsystemen bestehen kann. Wenn das Gefäßsystem bei einer Beschädigung reißt und die Reparatursubstanz freisetzt, kann es sich aus einem äußeren Reservoir oder aus unbeschädigten Kanälen, die mit ihm verbunden sind, wieder auffüllen. Das ermöglicht eine wiederholte Selbstheilung an ein und derselben Stelle.

Werkstoffe mit intrinsischer Selbstreparatur kommen dagegen völlig ohne separate Heilsubstanzen in abgetrennten Behältnissen aus. Hier ist die Fähigkeit, Schäden zu beheben, bereits im chemischen Aufbau des Materials angelegt. Solche Werkstoffe greifen auf molekulare Mechanismen zurück, wie zum Beispiel Wasserstoffbrückenbindungen, ionische Wechselwirkungen oder die Beweglichkeit und Verflechtung von Polymerketten. Diese Vorgänge sind allesamt reversibel, was eine mehrfache Heilung ermöglicht.

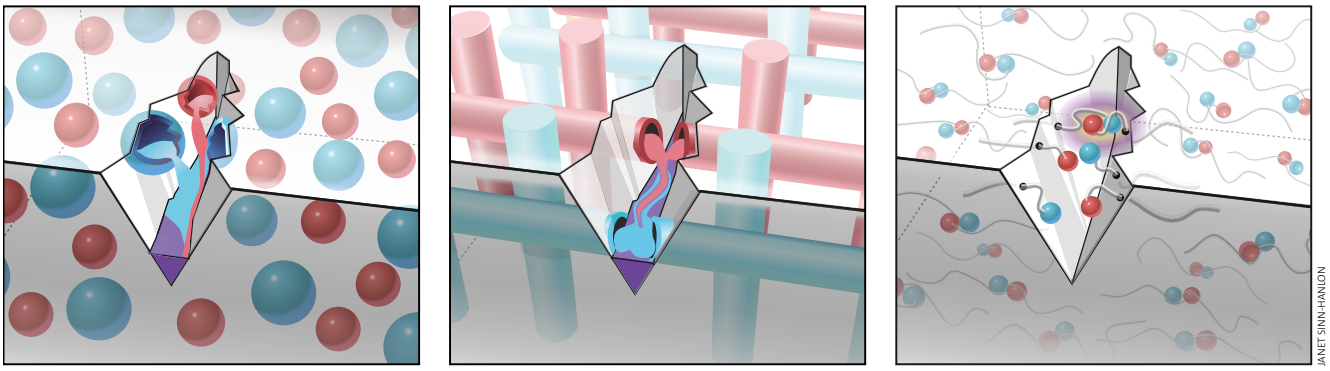
Wie lässt sich das Reagens bei Kapselsystemen in membranumhüllten Bläschen einschließen? Am einfachsten gelingt das mit einer Öl-in-Wasser-Emulsion. In diesem Fall ist die Hülle der Öltröpfchen zart und spröde wie eine Eischale und reißt bereitwillig bei Einwirkung einer äußeren Kraft. Man kann aber auch ein geschmolzenes Polymer in Wasser emulgieren, so dass sich Tropfen bilden, die beim Abkühlen oder Entfernen des Lösungsmittels härten. Dann entsteht eine dicke Schutzhülle um das Tropfeninnere.

Sobald sich die Heilsubstanz geschützt im Inneren der Kapseln befindet, gilt es, diese im Werkstoff zu verteilen. Im

Diese Kapseln auf den Verstärkungsfasern eines Polymers dienen zur Selbstreparatur. Sie enthalten ein flüssiges Reagens, das austritt, wenn sie bei einem Bruch des Materials beschädigt werden. Das Heilmittel füllt den entstandenen Riss, verfestigt sich und behebt so den Schaden. Die 15 Mikrometer dicken Glasfasern sind dünner als ein menschliches Haar und die Kapseln noch um den Faktor zehn kleiner. Solche Selbstheilungsmittel können auch über vernetzte Kanalsysteme freigesetzt werden oder integraler Bestandteil des Werkstoffs selbst sein.



BLASZIK B. ET AL.: AUTONOMIC RECOVERY OF FIBER/MATRIX INTERFACIAL BOND STRENGTH IN A MODEL COMPOSITE. IN: ADVANCED FUNCTIONAL MATERIALS 20, S. 3547–3554, 2010. ABDRUCK MIT FRDL. GEN. VON WILEY-VCH



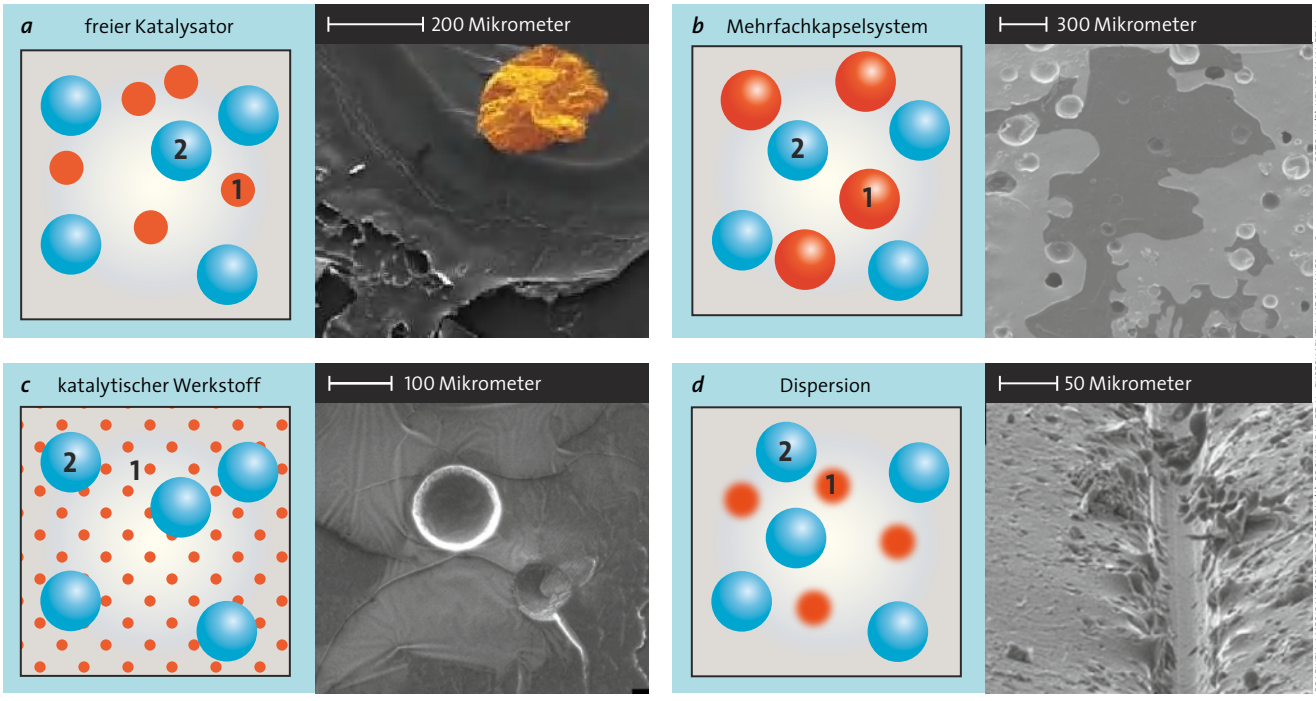
a Kapselsystem *b* Kanalsystem *c* intrinsisches System

JANET SINN-HANLON

Selbstheilungsmechanismen lassen sich grob in drei Klassen unterteilen. Kapselsysteme (*a*) sondern Heilsubstanzen (blau) und Polymerisatoren (rot) aus Kügelchen ab, die über den gesamten Werkstoff verteilt sind. Kanalsysteme (*b*) enthalten die beiden Komponenten in einem Netz aus wieder auffüllbaren Röhren. Werkstoffe mit intrinsischer Fähigkeit zur Selbstheilung (*c*) nutzen reversible chemische Bindungen, um Schäden auszubessern.

einfachsten Fall rührt man sie in das geschmolzene Material. Wie Versuche ergaben, überstehen die meisten Kapseln die Scherkräfte, Temperaturänderungen oder sonstigen Beanspruchungen, die beim Vermischen mit gängigen thermoplastischen Polymeren auftreten. Der so entstandene Verbundstoff muss dann eigens charakterisiert werden, weil die Kapseln das mechanische Verhalten des Grundmaterials wie seine Festigkeit, Bruchzähigkeit und Elastizität beeinflussen können. Schließlich lässt sich mit einer Reihe bildgebender Verfahren wie Lichtmikroskopie, Infrarot- und Röntgenspektroskopie oder Rasterelektronenmikroskopie überprüfen, wie gut der Reparaturmechanismus funktioniert.

Jede Heilung erfordert mindestens zwei Stoffe: das Reagens und einen Katalysator, der es polymerisieren und da-



GRAFIKEN: AMERICAN SCIENTIST: FOTO IN (A): BROWN, E.N. ET AL., EXPERIMENTAL MECHANICS 42, S. 372–379, 2002; FOTO IN (B): KELLER, M.W. ET AL., ADVANCED FUNCTIONAL MATERIALS 17, S. 2399–2404, 2007; FOTO IN (C): CARUSO, M.M. ET AL., ADVANCED FUNCTIONAL MATERIALS 18, S. 1898–1904, 2008; FOTO IN (D): CHO, S.H. ET AL., ADVANCED MATERIALS 21, S. 645–649, 2009; (A) ABDRUCK MIT FRDL. GEN. VON SPRINGER; (B)–(D) ABDRUCK MIT FRDL. GEN. VON WILEY-VCH

Selbstreparatursysteme auf Kapselbasis unterscheiden sich in der Unterbringung des Polymerisators (1), der für die Verkettung und damit Härtung der Heilsubstanz (2) sorgt. Er kann frei im Werkstoff (gelb) vorliegen (*a*) oder in gesonderten Kapseln eingeschlossen sein (*b*). In wieder anderen Systemen ist er Bestandteil des Grundmaterials selbst (*c*). Schließlich kann der Polymerisator auch in Form unlöslicher Tröpfchen – als Dispersion – im Werkstoff verteilt sein (*d*).

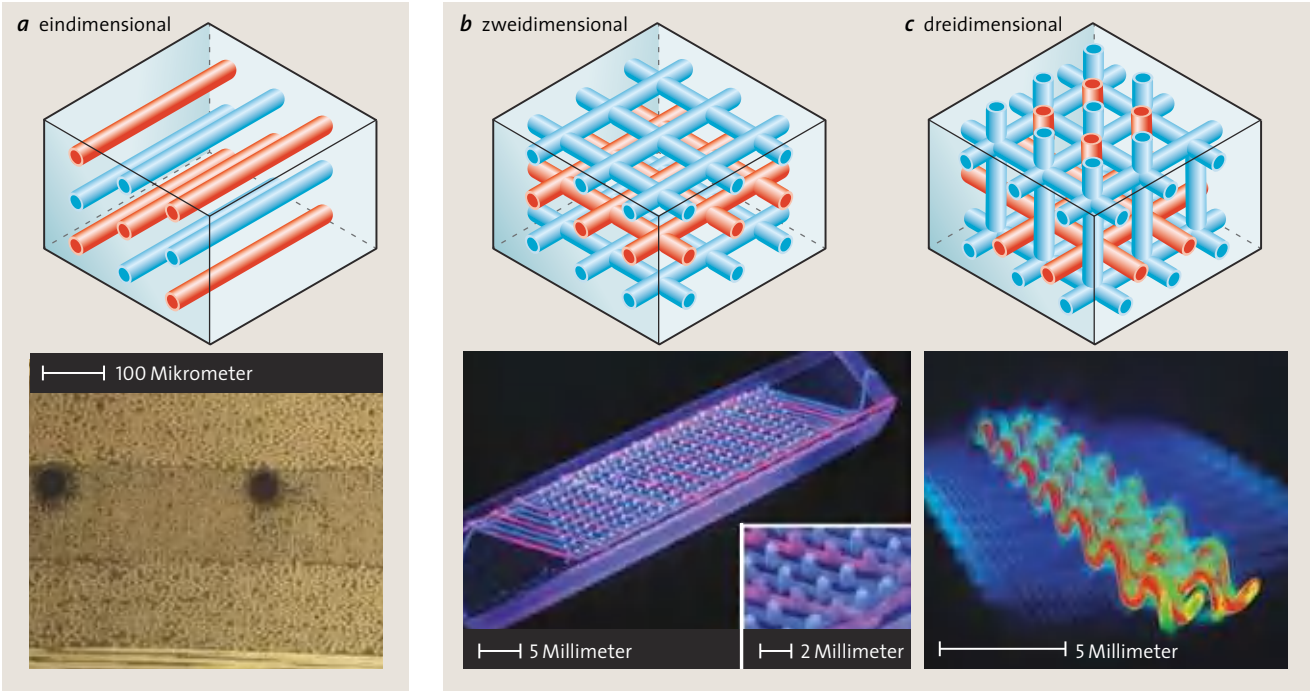
durch fest werden lässt. Beide dürfen nicht vorzeitig in Kontakt miteinander kommen. Zu diesem Zweck sind die Heilsubstanzen bei Kapselsystemen in Bläschen eingeschlossen. Der Katalysator kann dagegen frei im Grundmaterial vorliegen. Unsere Arbeitsgruppe hat dieses Verfahren bei verschiedenen Werkstoffen – darunter Epoxidharze und Faserverbundstoffe – erprobt. Generell war die Selbstheilungsrate hoch. Dadurch versagten die betreffenden Werkstoffe in Dauerbelastungstests nicht so schnell.

Besserer Korrosionsschutz durch sich regenerierende Beschichtungen

Bei einer Variante dieser Methode ist der Katalysator in inaktiver Form im Grundmaterial enthalten und wird erst durch einen Umweltreiz aktiviert, beispielsweise durch Zutritt von Sauerstoff oder Verdunstung. Man kann ihn aber auch wie die Heilsubstanz in gesonderten eigenen Kapseln unterbringen. Das empfiehlt sich vor allem, wenn mehr als zwei Komponenten für die Reparatur nötig sind. Wir haben solche Mehrkapselsysteme für ein Verfahren zum Korrosionsschutz genutzt. Dabei brachten wir in die Epoxidbeschichtung eines unedlen Metalls Membranbläschen, die entweder eine Heilsubstanz oder einen Katalysator auf Zinnbasis enthielten. Den gleichen Ansatz verfolgten wir bei einem selbstklebenden Laminat (Schichtverbundwerkstoff). Andere Arbeitsgruppen haben ähnliche Vorgehensweisen mit weiteren Reagenzien und Katalysatoren erprobt.

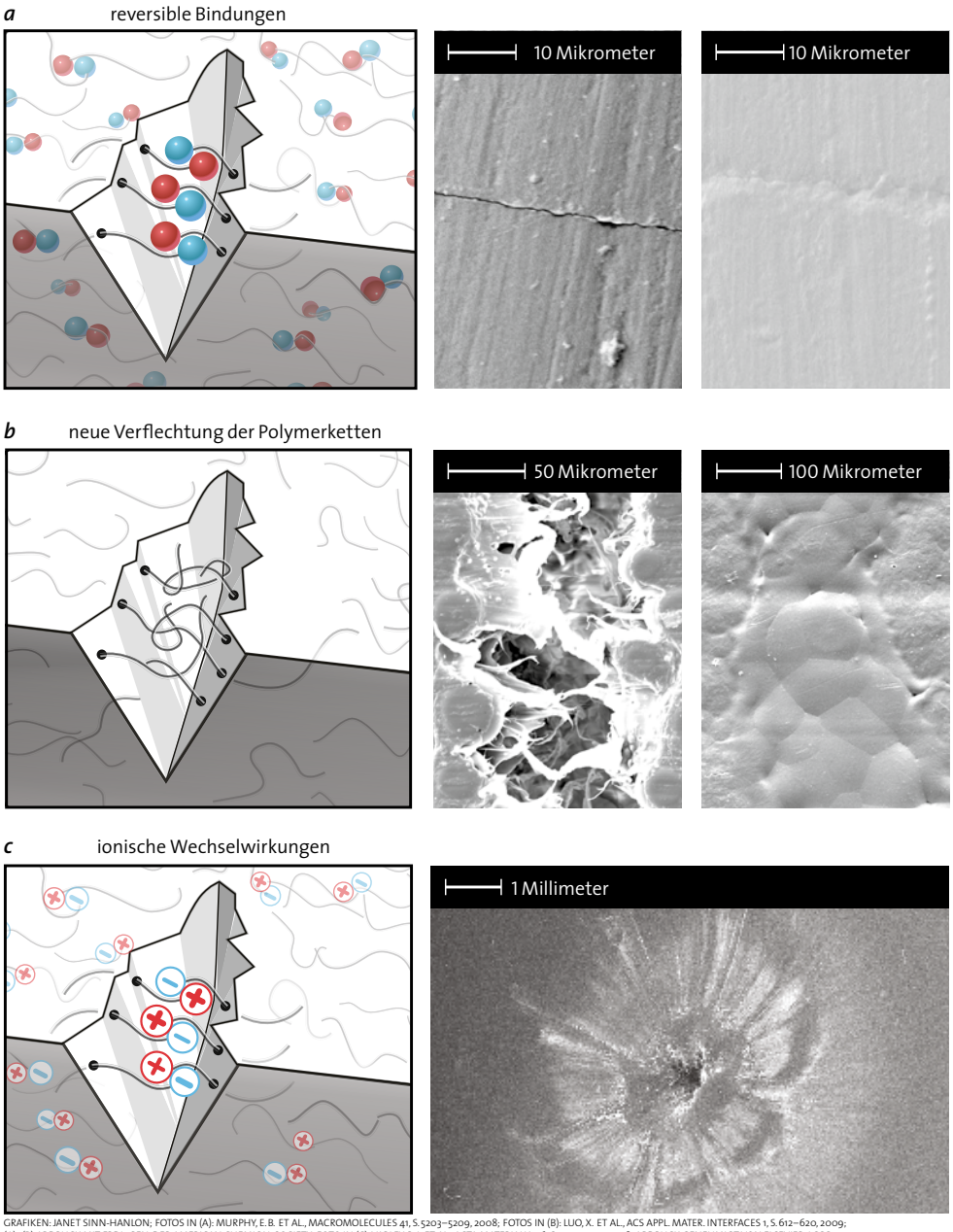
Selbstheilende Werkstoffe, die mit Kanälen arbeiten, müssen in der Regel zwei Kapillarnetze enthalten, die sich durchdringen, aber nicht in Kontakt miteinander stehen: eines für das Heilmittel und das andere für den Katalysator. Die Größe dieser Netze, ihr Anteil am Gesamtvolumen, ihre Einbettung in die Matrix, die Verteilung und Einheitlichkeit der Kanäle und die Steifigkeit ihrer Wandungen beeinflussen die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs. Das Design ähnelt in vieler Hinsicht dem von Kapselsystemen, es gibt aber auch grundlegende Unterschiede. So werden Kanalsysteme erst beladen, nachdem sie in den Werkstoff eingebaut sind – für gewöhnlich durch Anlegen eines Vakuums. Deshalb sind bei der Auswahl der Heilsubstanzen außer der chemischen Reaktivität auch Eigenschaften wie Benetzbarkeit und Viskosität zu berücksichtigen. Wenn ein Agens sehr zähflüssig ist oder die betreffende Kanaloberfläche nur schlecht benetzt, lässt sich das Kapillarnetz nicht gut damit füllen. Außerdem wird das Heilmittel dann wohl auch nicht problemlos zu einer Schadstelle transportiert und dort freigesetzt.

Die einfachsten Kanalsysteme arbeiten mit hohlen Glasfasern. Diese lassen sich leicht mit erprobten Verfahren herstellen und vertragen sich gut mit vielen Standardpolymeren. Ferner ist Glas chemisch sehr beständig und reagiert nicht mit gängigen Reparaturstoffen wie Zweikomponenten-Epoxidharzen. Überdies lassen sich Glasröhrchen leicht zusammen mit den Faserverstärkungen einbringen, die bei Verbundwerkstoffen gebräuchlich sind, da sie eine ähnliche



GRAFIKEN: AMERICAN SCIENTIST: FOTO IN (A): WILLIAMS, G. ET AL., COMPOSITES PART A 38, S. 1525–1532, 2007; ABDRUCK GENEHMIGT VON ELSEVIER / CCC; FOTO IN (B): HANSEN, C. J. ET AL., ADVANCED MATERIALS 21, S. 4143–4147, 2009; FOTO IN (C): ESSER-KAHN, A. P., ADVANCED MATERIALS 23, S. 3653, 2011; (B)+(C) ABDRUCK MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON WILEY-VCH

Bei selbstheilenden Kanalsystemen befinden sich Heilsubstanz (blau) und Polymerisator (rot) in verschiedenen Röhren. Eindimensionale Netzwerke (*a*) können aus hohlen Glasfasern hergestellt werden. Die rasterelektronenmikroskopische Aufnahme (*a*, unten) zeigt ein solches System im Querschnitt. Zwei- (*b*) und dreidimensionale (*c*) Netzwerke lassen sich erzeugen, indem man mit dem so genannten Direct-Ink Writing ein Gerüst erzeugt (*b*, unten) oder Verstärkungs- und »Opferfasern« miteinander verwebt (*c*, unten).



GRAFIKEN: JANET SINN-HANLON; FOTOS IN (A): MURPHY, E. B. ET AL., MACROMOLECULES 41, S. 5203–5209, 2008; FOTOS IN (B): LUO, X. ET AL., ACS APPL. MATER. INTERFACES 1, S. 612–620, 2009; (A)+(B) ABDRUCK MIT FRDL. GEN. DER AMERICAN CHEMICAL SOCIETY; FOTO IN (C): VARLEY, R. J. ET AL., ACTA MATERIALIA 56, S. 5737–5750, 2008; ABDRUCK GENEHMIGT VON ELSEVIER / CCC

Intrinsische Systeme zur Selbstheilung greifen auf drei Mechanismen zurück. Solche mit reversiblen Bindungen (*a*) nutzen die Tatsache, dass ein Polymer in seine Grundbausteine (Monomere) zerfallen und sich anschließend neu bilden kann. Sind die Moleküle an den Bruchflächen beweglich, können sich freie Ketten auf beiden Seiten des Spalts ineinander verschlingen und so für neuen Zusammenhalt sorgen (*b*). Heilung durch ionische Wechselwirkungen (*c*) gelingt beispielsweise über reversible Wasserstoffbrücken oder Ionencluster, die für neue Quervernetzungen zwischen den Spaltwänden sorgen können. Die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen (rechts) zeigen die Schadstellen vor und nach der jeweiligen Selbstreparatur.

Form und Größe haben. In den ersten Versuchen waren die Kanäle mit Durchmessern von einem Millimeter noch relativ dick; heute haben die dünnsten nur noch Querschnitte von 15 Mikrometern. Ein Nachteil von hohlen Glasfasern ist allerdings, dass sie sich nicht zu komplexeren Gefäßsystemen verbinden lassen. Das schränkt ihre Wirksamkeit ein.

Besser sind zwei- oder dreidimensionale Kapillarnetze mit Querverbindungen zwischen den Kanälen. Sie arbeiten zuverlässiger und haben auch eine höhere Speicherkapazität für Heilstoffe. Dadurch können sie größere Defekte beheben, und es ist leicht möglich, sie für erneute Einsätze wieder aufzufüllen. Zweidimensionale Netze eignen sich besonders gut für Verbundwerkstoffe mit Schichtstruktur. Sie lassen sich im Sandwichverfahren zwischen den einzelnen Schichten einbauen und beeinträchtigen die mechanischen Eigenschaften des Materials kaum.

Die meistverwendete Methode zur Herstellung zwei- und dreidimensionaler Kapillarnetze ist das so genannte Direct-Ink Writing (DIW). Vom Prinzip her handelt es sich um ein klassisches Wachsausschmelzverfahren oder einen Guss mit verlorener Form, allerdings auf Nanotechnologieebene. Zunächst wird eine Gerüststruktur innerhalb einer Gussform gebaut und diese mit dem flüssigen Vorläufer des Polymers gefüllt. Nach dessen Polymerisation zum festen Kunststoff löst man das Gerüst chemisch auf, wobei ein Netzwerk aus Hohlräumen zurückbleibt. Es kann fast beliebige Formen haben.

Bei einer Variante dieses Verfahrens haben wir Fasern, die nur bis 180 Celsius beständig sind, mit den Verstärkungsfasern eines Verbundwerkstoffs verwoben. Den resultierenden Vorformling gossen wir mit einem Harz aus, das wir dann durch Erwärmung aushärten ließen. Die behelfsmäßi-

gen Fasern verdampften wir schließlich bei Temperaturen von 200 bis 240 Grad Celsius. Zurück blieb ein Netz aus Kanälen, die dort, wo sich die ehemaligen Fasern überkreuzt hatten, miteinander verbunden waren. Auf diese Weise ist es in unserer Arbeitsgruppe kürzlich gelungen, äußerst komplexe Gefäßsysteme mit bis zu einen Meter langen Kanälen anzufertigen.

Um zu verstehen, wie ein dreidimensionales Netzwerk idealerweise beschaffen sein sollte, optimierten wir Eigenschaften wie Zuverlässigkeit, Gesamtvolumen und Durchmesser der Kanäle in Computersimulationen. Ferner versuchten wir mit der DIW-Methode die Struktur und Funktionsweise von Oberhautgewebe nachzuempfinden. Dazu erzeugten wir ein weiches Epoxidsubstrat mit einem dreidimensionalen Netz aus etwa 300 Mikrometer dicken Kanälchen und überzogen es mit einer spröden Epoxidschicht, die einen Polymerisator enthielt. Wenn wir durch Verbiegen Risse in der Beschichtung hervorriefen, strömte das heilende Agens aus dem darunterliegenden Gefäßsystem hinein und verschloss sie wieder.

Über 40 Eigenreparaturen am Stück

Das Netzwerk ließ sich nachfüllen, so dass sich die Proben bis zu siebenmal nacheinander selbst reparierten. Als Mitglieder unserer Arbeitsgruppe Heilstoff und Polymerisator in zwei getrennten Netzwerken unterbrachten, waren sogar 16 aufeinander folgende Reparaturen möglich. Durch Verbesserung der DIW-Methode gelang es uns schließlich, sich durchdringende, aber trotzdem voneinander isolierte Kapillarnetze zu bauen, die sogar über 40 Heilungszyklen in einer Beschichtung ermöglichten. Dank jüngster Fortschritte beim Design mehrdimensionaler Gefäßsysteme lassen sich inzwischen auch Schäden innerhalb der Matrix mehrfach reparieren.

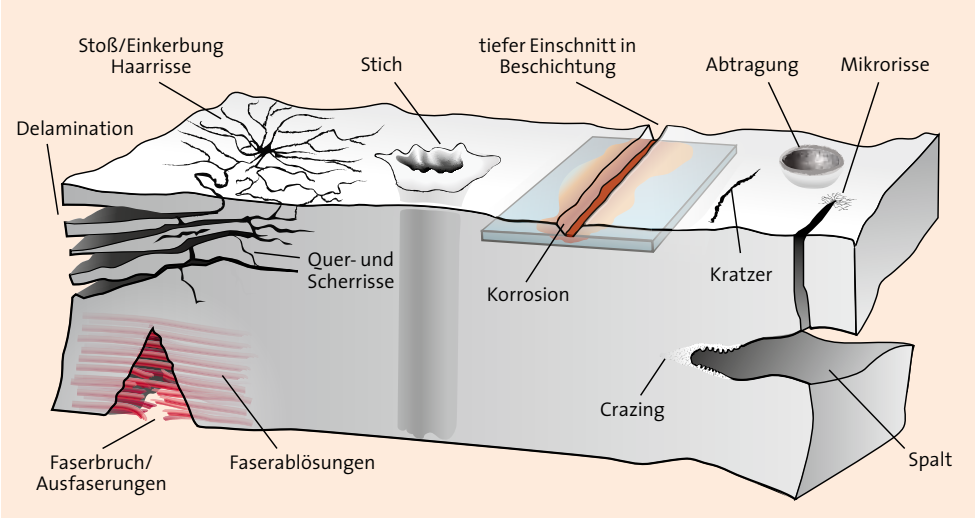
Ein Nachteil von Kapsel- wie Kanalsystemen ist, dass bei der Heilung zusätzliches Material in den Werkstoff eingebaut wird, was dessen Volumen vergrößert. Bei einem intrinsischen Selbstreparatursystem, das auf chemischen Besonderheiten des betreffenden Werkstoffs beruht, ist das nicht der Fall: Das Material regeneriert sich durch Knüpfen und Lösen chemischer Bindungen innerhalb der Polymermatrix. Daran können unter anderem temperaturabhängige Bindungen, Wasserstoffbrücken, Wechselwirkungen zwischen Ionen und molekulare Diffusionsvorgänge beteiligt sein.

In diesem Fall müssen keine Heilsubstanzen eingebaut oder freigesetzt werden, und es gibt keine Verträglichkeitsprobleme. Das vereinfacht das Design solcher Werkstoffe ganz erheblich. Dafür stellt sich nun allerdings das Problem, sicherzustellen, dass das Material die geforderten mechanischen, chemischen und optischen Eigenschaften aufweist. Zudem funktionieren Werkstoffe mit intrinsischer Selbstreparatur nur bei kleineren Schäden wirklich gut, weil die Risswände nahe beieinanderliegen müssen, damit sich neue chemische Verknüpfungen bilden können.

Polymere entstehen durch Verkettung einfacherer Bausteine, so genannter Monomere. Dies und die Möglichkeit, durch Energiezufuhr die Ketten wieder zu sprengen, eröffnet Wege zur intrinsischen Selbstreparatur. Wird beispielsweise ein Riss in einem Polymer stark erhitzt oder bestrahlt, kann dies einen entsprechenden Werkstoff an der Schadstelle aktivieren und mobilisieren, so dass sich neue Bindungen bilden und das Material verheilt. Mehrere Forschergruppen haben bei verschiedenen Polymeren und Verbundwerkstoffen mehrfache, durch Wärme ausgelöste Selbstreparaturzyklen nachgewiesen.

Ein anderer Ansatz besteht darin, den Werkstoff mit einem thermoplastischen Additiv zu versetzen. Wenn dieses beim Erhitzen erweicht, kann es in Risse und Spalten eindringen und nach dem Abkühlen und Aushärten die umliegende Werkstoffmatrix verkitten. Meist dehnen sich solche Additive auch beim Erwärmen aus und werden dadurch regelrecht in Hohlräume gepresst. Solche Heilvorgänge können an derselben Stelle mehrfach hintereinander ablaufen. Anschließend waren die Werkstoffe, wie Tests ergaben, wieder voll belastbar.

Manchmal enthalten bestimmte Abschnitte des Polymers auch elektrische Ladungen. Gruppen solcher Ionomere, wie



AMERICAN SCIENTIST

Die Schadensformen an Werkstoffen sind vielfältig und hängen vom Materialtyp sowie von der Art der Einwirkung oder Belastung ab. Die Grafik gibt eine Übersicht.

die geladenen Regionen heißen, können für reversible Quervernetzungen sorgen und so einen Spalt »vernähen«, wenn sie durch äußere Reize wie Hitze oder UV-Licht aktiviert werden. Einige Forscherteams haben derartige Ionomerenwerkstoffe mit Projektilen durchbohrt und festgestellt, dass die Reibungswärme, die das Geschoss beim Durchdringen des Werkstoffs erzeugt, ausreicht, um dessen Selbstheilung auszulösen. Das Loch schließt sich dann fast genauso schnell, wie es entstanden ist (siehe Bild rechts).

Man kann ein Polymer auch so aufbauen, dass die langen Kettenmoleküle über reversible Wasserstoffbrücken an ihren Enden und Seitenästen zusammengehalten werden. Das ergibt gummiartige Werkstoffe, in denen sich nach einer Schädigung neue Wasserstoffbrücken bilden, wenn man die Bruchflächen in engen Kontakt miteinander bringt. Desgleichen könnten sich Werkstoffe selbst reparieren, wenn die Polymermoleküle bei einem Bruch – etwa durch die damit einhergehende Erwärmung – an der Schadstelle beweglicher werden, so dass sie in die Lücke diffundieren und sich dort miteinander verflechten und verfilzen.

Im Idealfall sollte die Selbstheilung mindestens genauso schnell ablaufen wie die Schädigung. Bisher trifft das allerdings nur selten zu. Außerdem wird nicht immer der ursprüngliche Zustand komplett wieder hergestellt. Doch bei allen bisher erprobten Verfahren gibt es mindestens ein Beispiel, bei dem das der Fall ist. Veröffentlichte Werte zur Effizienz der Selbstreparatur verschiedener Werkstoffe liegen zwischen 20 und mehr als 100 Prozent; denn der verheilte Bereich kann sogar stabiler als vorher sein.

Die Ursachen für Schäden bei Polymeren und Verbundwerkstoffen sind vielfältig. Zu der langen Liste zählen Überlastung, Ermüdung, Schlag, Stich und Korrosion. Jede dieser Einwirkungen vermag eine Reihe unterschiedlicher Defekte hervorzurufen. Bei einem Schlag können beispielsweise Sprünge an der Oberfläche oder Ablösungen in den Schichten darunter auftreten, aber auch Risse oder Querrisse in der Polymermatrix. Um zu ermitteln, wie gut die Selbstheilung funktioniert, schädigt man den Werkstoff durch kontrollierte Einwirkung von Stoß-, Biege-, Zug- und Scherkräften. Anschließend wird geprüft, inwieweit das Material seine ursprünglichen mechanischen Eigenschaften zurückerlangt hat.

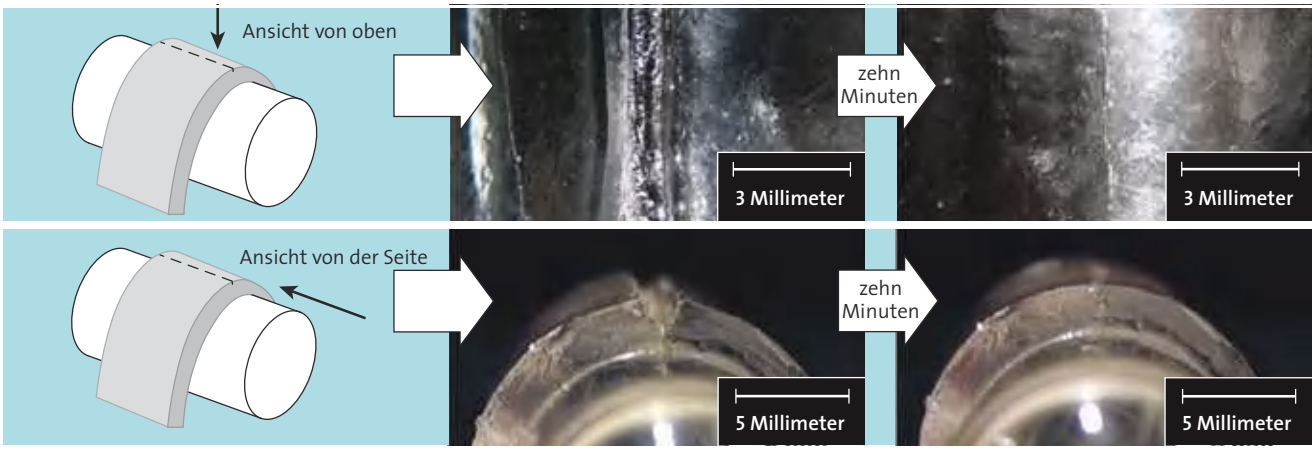
2001 gelang unserer Arbeitsgruppe erstmals eine Selbstregeneration per Kapselsystem in einem Epoxid, das nach der Heilung wieder 75 Prozent seiner ursprünglichen Festigkeit aufwies. Nebenbei machten wir eine weitere interessante Entdeckung: Die Mikrokapseln erhöhen die Bruchzähigkeit des Werkstoffs, weil sie die Energie sich ausbreitender Haarrisse absorbieren und so deren weiteres Vordringen verhindern.

Bruchstücke durch Zusammendrücken wieder verbinden

In jüngsten Versuchen hat unser Team die Kapseln direkt auf den Verstärkungsfasern aufgebracht, damit sie gezielt Schäden reparieren, die den Zusammenhalt zwischen Verstärkung und Matrix betreffen. In ersten Tests wurde gut die Hälfte der Bindungen zwischen Glasfasern und einer Epoxidmatrix wiederhergestellt. Wissenschaftler um H. Thomas Hahn von der University of California in Los Angeles (UCLA) prüften hingegen Kohlefaserverbundstoffe, die durch thermisch reversible Reaktionen über eine intrinsische Fähigkeit zur Selbstheilung verfügten. Bei künstlich erzeugten Mikrorissen betrug der Regenerationsgrad 90 Prozent, wenn das Material dreimal hintereinander für jeweils eine Minute auf 150 Grad Celsius erhitzt wurde.

Eine Methode zur Untersuchung selbstheilender Brüche besteht darin, die Oberfläche einer Polymerprobe anzuritzen und mit dem Mikroskop zu verfolgen, wie sich die Kerbe wieder schließt. In unseren Experimenten gingen wir noch weiter: Wir zerschnitten mit einer Rasierklinge Polymerproben und pressten die Teile dann 10 bis 15 Minuten lang bei Raum-

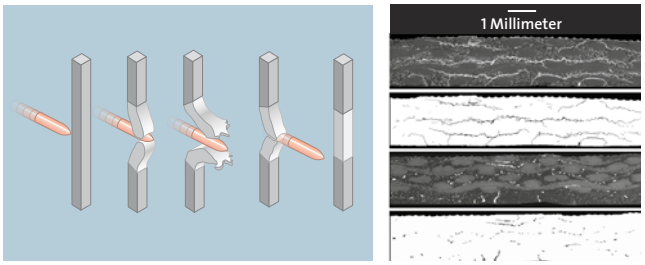
Beim Test eines Polymers mit intrinsischer Selbstheilung wurde es angeschnitten und über einen Zylinder gebogen (links). Die Fotos zeigen – jeweils von oben und von der Seite – die Schadstelle vor (Mitte) und nach der Heilung (rechts). Durch molekulare Diffusion und Verflechtung loser Polymerketten hatte sich die Kerbe nach nur zehn Minuten geschlossen.



GRAFIKEN: AMERICAN SCIENTIST; FOTOS: YAMAGUCHI, M. ET AL., MATERIALS LETTERS 61, S. 1396–1399, 2007; ABDRUCK GENEHMIGT VON ELSEVIER / CCC

a Ein Geschoss durchschlägt einen ionomeren Kunststoff.

b Delamination und Rissbildung in glasfaserverstärktem Polymer



LINKS: AMERICAN SCIENTIST;
RECHTS: MOLL, J.L. ET AL.: JOURNAL OF COMPOSITE MATERIALS 44, 5: 573–585, 2010; ABDRUCK MIT FRDL. GEN. VON SAGE PUBLICATIONS, LONDON

Wenn ein Geschoss ein Polymer mit einem Selbstheilungssystem auf Basis von Ionomeren durchschlägt (*a*), schnellt das durch die Reibungswärme des Projektils angeschmolzene Material in seine alte Position zurück. Die verbleibenden Risse schließen sich durch viskoses Fließen und Interdiffusion der geladenen Moleküle an den Bruchflächen. Bei einem anderen Versuch wurde ein Glasfaserverbundstoff durch Einkerben beschädigt (*b*). Die im Querschnitt sichtbaren Risse der Kontrollprobe (oben) sind bei einem Werkstoff mit integriertem Kapselsystem schon nach kurzer Zeit großenteils verheilt (unten).

temperatur aneinander, um sie wieder miteinander zu verbinden. Die derart reparierten Proben bogen wir schließlich oder verformten sie auf andere Art, um festzustellen, ob sie an der Schnittstelle aufbrechen würden. Einige der Proben waren schwächer als das ungeschädigte Ausgangsmaterial, aber bei vielen hielten die regenerierten Bereiche genauso gut. Analoge Ergebnisse erhielten wir, wenn wir die Proben nicht zerschnitten, sondern zerrissen.

Stöße können schwere Schäden unterschiedlichen Typs hervorrufen – beispielsweise Löcher, Abblätterungen oder verschiedene Arten von Rissen. Bisher lag der Schwerpunkt der Arbeiten zur Selbstregeneration bei Defekten, die Forscher durch langsam steigende Druckbelastung hervorriefen. Kürzlich haben Ian Bond und Richard Trask an der University of Bristol (England) jedoch ein karbonfaserverstärktes Epoxid, das ein Netzwerk aus hohlen Glasfasern mit einem Heilmittel enthielt, einem Belastungstest durch Stöße unterschiedlicher Energie bis maximal drei Joule unterzogen. Wie sich zeigte, pufferten die Kapillarnetze den Aufprall deutlich ab, da sie dabei zerbrachen. Das erhöhte die Druckfestigkeit des Materials um 13 Prozent. Beim Erwärmen verheilten die Schadstellen großenteils, wobei der Erfolg stark von einer gleichmäßigen Verteilung der Kanäle abhing.

Untersuchungen der Selbstheilung von Stoßschäden bei Werkstoffen mit Kapselsystemen lieferten uneinheitliche Resultate. Ming Qiu Zhang und Min Zhi Rong an der Universität Sun Yat-sen in Zhongshan in der chinesischen Provinz Guangzhou testeten glasfaserverstärkte Polymere mit verkapseltem Heilmittel. Bei Stoßenergien von 1,5 Joule war die Selbstregeneration fast vollständig, erreichte bei 3,5 Joule aber nur noch etwa 20 Prozent. In eigenen Versuchen mit einem ähnlichen Werkstoff erzielten wir dagegen für Stoßenergien bis 20 Joule eine 100-prozentige Heilung, obwohl dabei ausgedehnte Risse auftraten; erst bei noch heftigeren Stößen ließ der wachsende Umfang der Schäden die Erfolgsrate sinken.

Einkerbungen sind schonender und erlauben, das Schadensmaß besser zu kontrollieren. Die Arbeitsgruppe an der University of Bristol hat dieses Verfahren ausgiebig an Epoxidverbundstoffen mit hohlen Glasfasern als Kanälen angewandt, um die Freisetzung und den Transport von Heilstoffen, die mechanische Belastbarkeit und umweltbedingte Alterungsprozesse zu bestimmen.

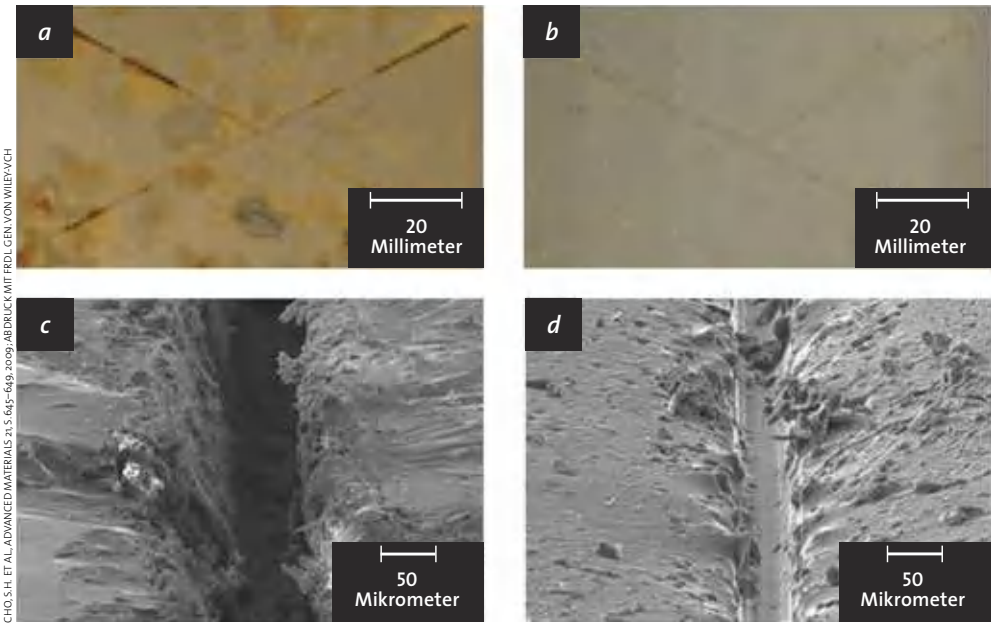
Ein Schaden kann auch bewirken, dass ein Werkstoff nicht mehr dicht ist und Gase oder Flüssigkeiten durchlässt. Dann geht etwa der Korrosionsschutz für ein damit beschichtetes Substrat verloren. Wir haben deshalb auch die Selbstheilung an dünnen Membranen und Beschichtungen untersucht. So verteilten wir Mikrokapseln zwischen zwei epoxidbeschichteten Nylonlagen. Anschließend stachen wir mit einer feinen Nadel Löcher hinein und prüften nach 24 Stunden die Dichtigkeit. Wie sich zeigte, hatten sich je nach Größe und Verteilung der Mikrokapseln zwischen 40 und 100 Prozent der Löcher wieder vollständig geschlossen.

Korrosionsbeständige Beschichtungen dienen zum Schutz von Eisenteilen, die Feuchtigkeit oder Salz ausgesetzt sind. Durch Zerkratzen oder Abrieb werden sie aber schnell undicht, weshalb eine Selbstheilung hier besonders wünschenswert erscheint. In unseren Arbeitsgruppen haben wir Metallstücke mit kapselhaltigen Beschichtungen auf Epoxid- und Vinylbasis untersucht. Wir ritzten die Schutzschicht an und benetzten sie anschließend mit Salzwasser. Nach einiger Zeit prüften wir die Proben auf sichtbare Anzeichen für Korrosion oder maßen die Impedanz (den Wechselstromwiderstand) an der Oberfläche, um frei liegendes Metall zu entdecken. Dabei schnitten die Kapselsysteme deutlich besser ab als normale Beschichtungen. Noch wirksamer sind womöglich intrinsische Selbstheilungssysteme, da sie kleinere Läsionen gut und schnell reparieren. Publikationen einiger Forschergruppen zufolge können sie Korrosion sogar vollständig unterbinden.

Auf dem Weg zur Praxisreife

Das junge Gebiet der sich selbst regenerierenden Werkstoffe hat in den vergangenen Jahren beachtliche Erfolge verbuchen können, und in nächster Zeit werden sicher chemische Heilmechanismen entdeckt, die noch wirksamer sind und schneller ablaufen. Doch gibt es weiterhin viele ungeklärte technische Fragen. So muss sich erst zeigen, wie gut selbstheilende Systeme langfristig unter rauen Umweltbedingungen funktionieren. Ihr praktischer Nutzen hängt vermutlich davon ab, ob sich auch Materialermüdung und wiederholte Schädigungen damit bekämpfen lassen. Die bisherigen Untersuchen beschränken sich weit gehend auf Brüche infolge zu hoher akuter Spannung. Wie sich ein Stoff bei Schäden durch Dauerbelastung regenerieren könnte, ist noch kaum erforscht.

Um dem Gebiet zum Durchbruch zu verhelfen, wäre es wichtig, das Potenzial der Selbstheilung möglichst bald anhand eines marktfähigen Produkts unter Beweis zu stellen.



CHO, S. H. ET AL. ADVANCED MATERIALS 21, S. 645–649, 2009; ABDRUCK MIT FRDL. GEN. VON WILEY-VCH

Durch das Kapselsystem in der Epoxidbeschichtung eines Stahls schloss sich ein Kratzer so weit, dass im Gegensatz zu einer Probe ohne Selbstheilung (links) keine Korrosion auftrat (rechts). Gezeigt sind Aufnahmen im Licht- (oben) und Elektronenmikroskop (unten).

Dafür bieten sich wohl am ehesten Oberflächenbeschichtungen an, weil sie im Vergleich zu Strukturwerkstoffen nur relativ geringer mechanischer Belastung ausgesetzt sind. Außerdem spielen sie in vielen Industriezweigen eine Rolle.

Höchstwahrscheinlich werden Selbstheilungsysteme bei künftigen großtechnischen Verfahren nicht gleichmäßig im Werkstoff verteilt, sondern gezielt nur an bestimmten Stellen eingebaut. Das spart Kosten, steigert die Effizienz und beeinträchtigt die Festigkeit des Materials möglichst wenig.

Selbstregeneration muss im Übrigen nicht darauf beschränkt bleiben, einem Werkstoff seine mechanischen Eigenschaften zurückzugeben. Sie könnte beispielsweise auch seine elektrische Leitfähigkeit wiederherstellen, was in der Mikroelektronik oder auf dem Gebiet der Energiespeicherung sehr nützlich wäre. Schadhafte Computerchips müssten dann nicht mehr unbedingt ausgetauscht werden, sondern würden sich bei Erwärmung vor Ort selbst reparieren. Unsere Arbeitsgruppe hat ebenso wie einige andere Teams halbleitende metallorganische Polymere synthetisiert, bei denen das gelingt. Außerdem waren wir kürzlich mit Mikrokapselsystemen erfolgreich, die hochleitfähige Substanzen freisetzen.

Auch Störungen optischer Eigenschaften lassen sich unter Umständen mit selbstheilenden Systemen beheben. Da Risse einen anderen Brechungsindex als ihre Umgebung haben, streuen sie Licht und beeinträchtigen die Transparenz. Indem ein Kanal- oder Kapselsystem ein Polymer mit passendem Brechungsindex zum Ort des Schadens transportiert, könnte es die Trübung abschwächen oder sogar aus der Welt schaffen.

Das Prinzip der Selbstheilung verspricht erhöhte Sicherheit und längere Lebensdauer sowie geringere Wartungs- und Reparaturkosten für die verschiedensten Werkstoffe und Produkte. Sich selbst ausbessernde Autolacke und Reifen sowie ausfallsichere Elektrogeräte sind nur wenige Beispiele für die ungeahnten Möglichkeiten der neuen Technologie. Vielleicht kann sie sogar mehr als nur heilen. Dabei weist die Biologie wiederum den Weg. So können sich Knochen nicht nur regenerieren, sondern als Reaktion auf besondere Beanspruchungen auch ihre Form und Struktur ändern. Gut möglich also, dass synthetische Werkstoffe, die sich heute nach einer Beschädigung lediglich reparieren, sich in Zukunft außerdem selbsttätig an die jeweiligen Belastung anpassen, um ihr besser zu widerstehen.

DIE AUTOREN

Scott R. White (links) ist Professor für Luftfahrttechnik an der University of Illinois in Urbana-Champaign. **Benjamin J. Blaiszik** hat ein Postdoc-Stipendium am Center for Nanoscale Materials des Argonne National Laboratory (Illinois).

QUELLEN

Blaiszik, B.J. et al.: Autonomic Recovery of Fiber/Matrix Interfacial Bond Strength in a Model Composite. In: Advanced Functional Materials 20, S. 3547–3554, 2010

Bond, I.P. et al.: Self-Healing Fiber-Reinforced Polymer Composites. In: MRS Bulletin 33, S. 770–774, 2008

Gragert, M. et al.: Azide/Alkyne-»Click«-Reactions of Encapsulated Reagents: Toward Self-Healing Materials. In: Macromolecular Rapid Communications 32, S. 419–425, 2011

Haase, T. et al.: Selbst heilende Polymere. In: Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau 6, S. 225–230, 2010

Hager, M.D. et al.: Self-Healing Materials. In: Advanced Materials 22, S. 5424–5430, 2010

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1139710**

© American Scientist
www.americanscientist.org

Anzeige

Ernst Peter Fischer
Das große Buch der Elektrizität
Fackelträger, Köln 2011. 370 S., € 39,95

WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Ein virtuelles Museum der Elektrizität

Ernst Peter Fischer erzählt in opulenten Bildern, wie die Kraft der ruhenden und bewegten Ladungen entdeckt, erklärt und zur omnipräsenten Dienerin unseres Alltags wurde.

»Ich meine, dass das Unbehagen an der Wissenschaft vor allem dadurch zu Stande kommt, dass dieses Unternehmen es verlernt hat, neben der logischen Erkenntnis, die sie glänzend und großartig liefert, auch die sinnliche Erkenntnis zu berücksichtigen, die es komplementär zu ihr gibt.« Dieser Satz von Ernst Peter Fischer steht als Motto auf der Medaille für Naturwissenschaftliche Publizistik, die ihm 2004 von der Deutschen Physikalischen Gesellschaft verliehen wurde und die zu den vielen Ehrungen des renommierten Wissenschaftshistorikers und Bestsellerautors gehört.

»Das große Buch der Elektrizität« ist in der Tat etwas für die sinnliche Erkenntnis: Großformatig und opulent ausgestattet, bietet es einer beeindruckenden Fülle an Bildern und Texten Raum, welche die Geschichte des Elektromagnetismus anschaulich und fesselnd vor Augen führen. Die Bilder ziehen den Leser gleichsam in ein virtuelles Technikmuseum hinein; und wie es sich für ein Museum gehört, vermittelt das Buch einen ersten Eindruck von der allgemeinen kulturellen Bedeutung dieser Technik und ihrer grundlegenden Ideen. Es macht Lust auf die Wissenschaft von der Elektrizität und deren Geschichte, weil es dem Leser nicht abverlangt, sich in die physikalischen und technischen Grundlagen einzuarbeiten.

Zunächst fallen die historischen Zeichnungen ins Auge: erste Versuchsanordnungen zur Erzeugung und Messung der Elektrizität mit Bernstein, Draht, Spule und Metallplatten; verschiedene Generationen von Generatoren, Motoren, Akkumulatoren und Transformatoren; Straßenbahnen und elektrisch betriebene Autos Ende des 19. Jahrhunderts, moderne Elektronik mit Halbleitertransistoren und schließlich integrierte Schaltkreise. Zum Ende des Buchs hin ersetzen immer mehr Fotos die Zeichnungen – nicht nur, weil sie aus jüngeren Zeiten leichter verfügbar sind, sondern auch, weil kein einzelner Erfinder mehr so komplexe Anwendungen wie einen Mikrochip oder eine moderne Anlage zur Energieerzeugung zu zeichnen vermöchte.

Die leicht lesbaren und mit vielen Überraschungen aufwartenden Texte betten die Bilder in eine reflektierende und kommentierende Erzählung zur Chronologie der Ereignisse ein. Sie sind in thematische Abschnitte gegliedert, entsprechend den Darstellungsansätzen der modernen historischen Forschung. Dabei veranschaulichen die Bildunterschriften und geschickt eingestreute Zitate immer wieder neue Aspekte: Fein dosiert werden neben den historischen und kulturellen Zusammenhängen auch Funktions- oder Bauprinzipien erörtert.

Im Einleitungskapitel führt Fischer als roten Faden die »Dualität« der Anziehung und Abstoßung zwischen den elektrischen und magnetischen Polen ein, mit ideengeschichtlichen Andeutungen zur Denkweise der romantischen (Natur-)Philosophie, die – implizit – darauf hinweisen, warum in der Philosophie eines Aristoteles oder Albertus Magnus die Elektrizität des Bernsteins nicht erklärbar war.

Der Hauptteil beginnt mit den physikalischen und technischen Entwicklungen im historischen Kontext, von der Entdeckung der Eisenanziehung einiger Gesteine in der Umgebung des antiken Magnesia bis zur Erfindung des Dynamos; es folgen die verschiedenen Aspekte des Stroms der fließenden Elektronen, von der Umwandlung elektrischer Energie in mechanische Arbeit bis hin zu Einsteins Erklärung des fotoelektrischen Effekts, die einen bedeutenden Beitrag zur Quantentheorie lieferte, zu den elektrischen Aktionspotenzialen in den Nervenzellen und schließlich zur Elektronik, die heute in Computern zum Einsatz kommt.

Auch fehlerhafte Experimente bringen die Wissenschaft voran

Selbst so schwierige physikalische Themen wie die maxwellschen Gleichungen werden zum Betrachten als Formeln auf einer Tafel einladend ins Bild gesetzt. »War es ein Gott, der diese Zeichen schrieb?« Bei diesem Zitat aus Goethes »Faust«, das die Bewunderer Maxwells umdeutend auf seine Gleichungen bezogen, darf der Leser erst einmal verschnaufen, ehe es an die historische Bedeutung, die vier Formeln in der heutigen Fassung und ihre physikalische Deutung geht. Man kann in den Gleichungen Symmetrien und Asymmetrien sehen, ohne verstehen zu müssen, wie die Veränderungen des elektrischen und des magnetischen Felds in elektromagnetischen Wellen zusammenhängen und wie sich die Quellen beider Felder unterscheiden: Es gibt elektrische, aber keine magnetischen Monopole.

Für Experten sind die Abbildungen eine Fundgrube, aber die Erläuterun-

gen werden ihnen bisweilen zu oberflächlich bleiben. Pädagogen mögen bemängeln, dass die Formelsymbole etwa in den maxwellschen Gleichungen nicht vollständig erklärt sind.

Historiker könnten einwenden, dass nicht die historische, sondern die moderne Fassung dieser Gleichungen zitiert ist oder dass Fischer methodisch problematische Experimente wie Millikans Öltröpfchenversuch oder die bislang einzige Messung eines magnetischen Monopols erwähnt, ohne auf die weitere Entwicklung einzugehen. Immerhin gab es in Millikans Originaldaten gar nicht die eindeutige Verteilung der Messpunkte, mit der sich die Elementarladung verlässlich hätte bestimmen lassen, aber der amerikanische Physiker hatte die richtige Intuition, und Wiederholungen des Experiments konnten dem Mangel abhelfen. Dagegen sind alle weiteren Versuche, einen magnetischen Monopol nachzuweisen, fehlgeschlagen. Diese Experimente illustrieren, wie wissenschaftlich-technische Entwicklung auch durch methodisch ungesicherte oder gar fehlerhafte Daten fortschreitet.

Bei den historischen Abbildungen hätte man sich zusätzlich zum urheberrechtlich korrekten Verweis auf Bildagenturen eine konsequente Nennung der Quellen nach dem Standard historischer Fachbücher gewünscht. Naturwissenschaftler und Technikexperten hätten möglicherweise eine tiefer gehende Behandlung der Themen ihres Fachs bevorzugt. Und Geistes- und Sozialwissenschaftler werden sicherlich nicht jeder Deutung des Autors zustimmen.

Dieses Buch ist jedoch für den Laien geschrieben, der sich für Elektrizität interessiert, aber die physikalisch-technische Materie eher links liegen lassen will. Ihm bietet es einen lesenswerten Überblick, mit vielen überraschenden und bereichernden Einzelheiten.

Katharina Neuser-von Oettingen
Die Rezensentin ist Diplomphysikerin und Wissenschaftspublizistin. Sie hat viele Jahre als Redakteurin und Lektorin gearbeitet, zuletzt für den (wissenschaftlichen) Springer-Verlag.

In dieser Zeichnung aus dem Jahr 1881 fragen sich die Könige Dampf und Kohle mit sorgenumwölkter Miene, was aus dem Säugling Elektrizität wohl werden wird.

Axel Brennicke

***Tödliches Geflecht.** Ein biologischer Thriller*

Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2012. 266 S., € 19,95

Ein mutierter Getreidepilz verbreitet sich auf Europas Feldern und vernichtet die Ernten. Wer den giftigen Sporenstaub einatmet, erleidet Krämpfe und stirbt vielleicht sogar. Der junge Molekularbiologe Felix Hildhof und seine französische Kollegin Nicole Duvalle rücken – mittels Gentechnik – dem Pilz und – auf traditionellem Weg – einander zu Leibe. In beiden Fällen mit Erfolg, wie es sich für einen Roman gehört. Bis dahin muss der Leser ausführliche Schilderungen des Laboralltags und viele fachliche Details durcharbeiten; denn Axel Brennicke, Inhaber des Lehrstuhls für Molekulare Botanik an der Universität Ulm, legt Wert auf eine wissenschaftsnahe Darstellung. Wer sie nachvollziehen will, muss gute Vorkenntnisse in Molekularbiologie oder zumindest die Bereitschaft zu intensiver Arbeit mitbringen. Die zahlreichen Seitenhiebe des Autors gegen Politiker und Behörden wirken allerdings etwas platt. FRANK SCHUBERT

Holger Dambeck

***Je mehr Löcher, desto weniger Käse.** Mathematik verblüffend einfach*

Kiepenheuer & Witsch, Köln 2012. 240 S., € 8,99

Das Fach Mathematik spaltet »die Menschen in zwei Lager ... wie kein anderes. Die einen lieben es, die anderen bekommen Albträume.« So Holger Dambeck, Autor der Kolumne »Numerator« bei »Spiegel online« und Träger des Journalistenpreises der Deutschen Mathematiker-Vereinigung, der ohne Zweifel zum ersten Lager zählt. Die Aufgaben, die er jedem Kapitel beifügt, rufen zwar nach einer Lösung mit Schulmitteln. Aber im Übrigen bringt er – mit Hilfe klassischer Beispiele – dem Leser nahe, dass Mathematik eine kreative, geradezu künstlerische Tätigkeit ist und eben nicht das sinnentleerte Einsetzen irgendwelcher Zahlen in unverstandene Formeln. Er selbst hat zwar als Schüler an Mathematik-Olympiaden teilgenommen, aber dann doch lieber Physik studiert – aus Sorge, vor lauter Abstraktion den Kontakt zur realen Welt zu verlieren. CHRISTOPH PÖPPE

Lone Frank

***Mein wundervolles Genom.** Ein Selbstversuch im Zeitalter der persönlichen Genforschung*

Aus dem Englischen von Ursel Schäfer. Hanser, München 2011. 336 S., € 19,90

Das Buch ist besser, als der Titel befürchten lässt. Die dänische Biologin und ehemalige Hirnforscherin Lone Frank hat ihr eigenes Genom und das ihrer Verwandten von verschiedenen kommerziellen und medizinischen Stellen analysieren lassen und schildert freimütig ihre Erfahrungen. Das ist spannend zu lesen; zudem bieten die zahlreichen Hintergrundgespräche mit Wissenschaftlern, Ärzten und Industrievertretern neben einer Menge Information auch Kurzweil. Frank versteht es, schwierige Sachverhalte gut verständlich, in klaren Bildern und erfrischend lebendig zu beschreiben. Wer sich einen Einblick in das rasant expandierende Feld der individuellen Gen- und Genomanalysen verschaffen möchte, bekommt hier viel geboten, darunter auch typische Missverständnisse – und das Ganze ist oft mit Humor und gesunder Skepsis garniert. ADELHEID STAHNKE

Gero Vogl

***Wege des Zufalls.** Tanz der Atome, Invasion neuer Arten, Ausbreitung von Seuchen und Sprachen*

Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2011. 208 S., € 17,95

Wenn ich eine Eisenstange an einem Ende erhitze, ist bald auch das andere Ende warm. Der französische Physiker Joseph Baptiste Fourier (1768–1830) schrieb ein grundlegendes Buch über solche Wärmeströme, obwohl man damals noch gar nicht genau wusste, was da eigentlich strömt. Dann untersuchte der deutsche Physiologe Adolf Fick (1829–1901), wie Teilchen diffundieren – und entdeckte, dass sein Ausbreitungsgesetz mit Fouriers Formel exakt übereinstimmt. Damit ist die Geschichte des Diffusionsbegriffs aber noch lange nicht zu Ende. Der österreichische Physiker Gero Vogl fand 1976 ein spezielles Gesetz dafür, wie radioaktive Teilchen durch Festkörper wandern, und erforscht seither in interdisziplinären Arbeitsgruppen die unterschiedlichsten Diffusionsphänomene – von der Ausbreitung biologischer Arten bis zu der von Seuchen, Sprachen und Kulturen. Darüber hat er ein ungemein lebendiges und überhaupt nicht diffuses Buch geschrieben. MICHAEL SPRINGER

Josef H. Reichholf
Der Ursprung der Schönheit
Darwins größtes Dilemma
C.H.Beck, München 2011. 304 S., € 19,95

ZOOLOGIE

Prachtfedern zum Wegwerfen

Heute ist das Pfauenrad ein Mittel, um die Weiblichkeit zu beeindrucken. Aber ursprünglich entstand es zur Müllentsorgung.

Der Erpel der Mandarinente *Aix galericulata* hat von seinem Prachtkleid keine Nachteile. Seine Überlebensrate ist sogar höher als die des Weibchens.

Nach herkömmlicher Auffassung haben die Männchen etlicher Tierarten das Pech, sich mit einem Handikap abplagen zu müssen: sperrige Geweihe oder Gehörne, grellbuntes Gefieder, ellenlange Mähnen oder halsbrecherische Balzrituale. Den Pfauenhahn kostet sein imposantes Schwanzgefieder einen ungeheuren Aufwand an Energie, es belastet ihn auf Schritt und Tritt, macht seine Feinde auf ihn aufmerksam, behindert ihn bei der Flucht und versperrt ihm – im aufgefächerten Zustand – die Sicht nach hinten.

Nach Darwins Theorie der sexuellen Selektion haben sich solche extravaganten körperlichen Merkmale und Verhaltensweisen entwickelt, weil die Weibchen anhand dieser Eigenschaften ihren Paarungspartner wählen. Ein zufällig entstandenes derartiges Merkmal und dessen ebenso zufällige Bevorzugung durch die Weibchen hätten sich im Lauf der Evolution gegenseitig verstärkt. Im Extremfall könne eine Art durch dieses Wettrüsten der Männchen am Ende in eine evolutionäre Sackgasse geraten.

Die Handikap-Theorie der israelischen Biologen Amotz und Avishag Zahavi fügt Darwins Überlegungen ein entscheidendes Argument hinzu: Je kräftiger und widerstandsfähiger ein Männchen ist, desto eher ist es in der Lage, trotz schwerer Handikaps in einer feindlichen Umwelt zu überleben. Gerade deswegen zeigen die hinderlichen Merkmale den Weibchen zuverlässig an, wie es um die körperliche und genetische Fitness ihrer Freier bestellt ist.

In diese Diskussion bringt der Münchner Zoologe Josef Reichholf nun eine neue, überraschende These: Das vermeintliche Handikap ist in Wirklichkeit gar keins. Während die Erpel ihr farbenprächtiges Brunftkleid tragen (Bild), werden sie nicht häufiger gefressen als im Schlichtkleid. Dem Pfauenhahn dient das luxuriöse Prachtgefieder gegen seinen einzigen ernst zu nehmenden Fressfeind, den Leoparden, als Schutzschild gegen einen Angriff von hinten. Im äußersten Notfall kann er sich seines Schmucks durch »Schreckmauser« entledigen und damit dem Leoparden statt seiner selbst einen unappetitlichen Haufen Federn zum Fraß vorwerfen. Außerdem erzeugen seine Zierfedern im Dschungel ein Flimmern und Glitzern, das seinen Feinden das Erkennen erschwert.

Der auffällige Körperschmuck hat noch eine weitere, unerwartete Funktion: Er dient als Sondermülldeponie. Tropische Vögel ernähren sich in erster Linie von Früchten, die reich an Farbstoffen sind. Da das Zeug für sie teils giftig, teils nutzlos ist, deponieren sie es in ihren Federn, wo es keinen Schaden anrichten kann. Das gilt auch für die weniger auffälligen braunen und schwarzen, melaninhaltigen Pigmente der Vögel in anderen Klimazonen.

Das sei, so vermutet Reichholf, sogar die ursprüngliche Funktion der Federn gewesen, bevor sie zum Fliegen »zweckentfremdet« wurden. »Die Feder ist ein Produkt des Stoffwechsels, und zwar entstanden aus … Eiweißbestandteilen, die Schwefel enthalten. Würden die, wie bei Säugetieren, im Körper abgebaut werden müssen, entstünde giftiger Schwefelwasserstoff«, und zwar bei Vögeln wegen ihrer hohen Stoffwechselintensität in so großen Mengen, dass sie das Abfallproblem anders als die Säuger nicht allein durch Ausscheiden lösen könnten.

Ein Weibchen investiert einen Teil seiner Energie und seiner Stoffwechselprodukte in den Nachwuchs. Das Männchen – einigermaßen vergleichbaren Stoffwechsel vorausgesetzt – muss diesen Anteil auf andere Weise loswerden. Was beispielsweise die Pfauenhenne an Proteinen für die Erzeugung von Eiern von ihrem Körper abgibt, steckt der Hahn in sein Prachtgefieder. Die Herstellung der Eier verschlingt so viel Energie wie die der langen Schwanzfedern. Und der Energieaufwand der Henne fürs Brüten entspricht dem, was der Hahn aufbringen muss, um seine Schmuckfedern zum Rad aufzustellen und sie rascheln zu lassen.

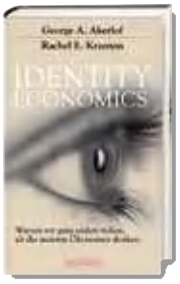
Das Prachtgeweih des Hirschbocks enthält so viel Kalziumphosphat, wie die Hirschkuh zum Aufbau der Kno-

chen ihrer Kälber investiert hat. »In der Bilanz entsprechen diese Spitzenleistungen des mütterlichen Stoffwechsels den Investitionen der Hirsche in ihr Geweih und ihr Gewicht. Männliches Brunftgehabe wäre somit geradezu ein physiologisches Abbild der weiblichen Schwangerschaft.« Und wo die Zusammensetzung der Nahrung diese Deponiefunktion nicht erzwingt, umwerben die Männchen ihre Partnerinnen weniger durch Körperschmuck als durch akrobatische Balz oder Gesangskunst.

Reichholf gelangt am Ende zu dem Resultat, dass als »schön« schlicht diejenigen Attribute aufzufassen sind, an denen die Weibchen erkennen können, ob die Männchen gesund und mit guten Genen ausgerüstet sind und ob sie im Stande sind, genügend zur Versorgung des Nachwuchses beizutragen. Dabei ist jede Form der Symmetrie ein Anzeichen dafür, dass die körperliche Entwicklung ohne größere Störungen verlaufen ist und das Immunsystem gut funktioniert.

Das sind keine neuen Einsichten. Dafür ist umso verblüffender, was Reichholf über die verwickelten Beziehungen zwischen ökologischen Bedingungen, Stoffwechselprozessen und den Mechanismen der sexuellen Selektion zu sagen hat. Seine gewagte, aber empirisch leicht überprüfbare Theorie kann darüber hinaus schlüssig erklären, warum die sexuelle Selektion nicht bei allen Tierarten wirkt, warum sie sich von Art zu Art unterschiedlich auswirkt und was den in der Menschenwelt geltenden Schönheitsvorstellungen zu Grunde liegt. Ein exzellentes Buch.

Frank Ufen
Der Rezensent ist freier Wissenschaftsjournalist in Marne.



George A. Akerlof, Rachel E. Kranton
Identity Economics
Warum wir ganz anders ticken, als die meisten Ökonomen denken
Aus dem Amerikanischen von Helmut Dierlamm. Hanser, München 2011. 208 S., € 19,90

WIRTSCHAFTSWISSENSCHAFT

Noch ein Angriff auf den Homo oeconomicus

Wir legen in unserem Leben nicht nur Wert auf unseren Nutzen, sondern auch auf unsere »Identität«: die Zugehörigkeit zu einer sozialen Gruppe.

Der reißerische Untertitel täuscht. Dieses Buch ist eben nicht einer jener Bestseller, die eine neue, »ganz andere« Erklärung für ökonomische Phänomene versprechen, geläufige Vorurteile von der Weltfremdheit der Theoretiker bedienen und dann an Stelle konkreter Gegenentwürfe doch nur unverdautes Faktenwissen und einige Verschwörungstheorien anbieten. George A. Akerlof (Jahrgang 1940), Professor an der University of California in Berkeley, ist geradezu das Musterbeispiel eines seriösen Wirtschaftswissenschaftlers.

Bekannt wurde er vor allem durch Arbeiten über das Funktionieren von Märkten bei unvollständiger Information, die heute zum Basiswissen jedes Ökonomen gehören. 2001 erhielt er den Wirtschaftsnobelpreis; sein Mitpreisträger Joseph Stiglitz und er gründeten 2009 das von George Soros finanzierte Institute for New Economic Thinking. Seine Fachkollegin Rachel E. Kranton, eine Generation jünger als Akerlof, ist Professorin an der Duke University und hat sich vor allem mit der Übertragung soziologischer Ansätze in die Ökonomie beschäftigt.

Genau zu diesem Thema hatte sie bereits 1995 in einer Kritik an einem Aufsatz Akerlofs ein Defizit der Forschung beklagt. Die Wirtschaftswissenschaft verfüge noch nicht über die notwendigen analytischen Mittel, um das empirische Material zu verwerten, das die soziologische Forschung in den letzten Jahrzehnten bereitgestellt habe. Die Integration dieser Ergebnisse werde ein realistischeres Menschenbild liefern und damit auch zu einer erfolgreicheren Gestaltung von Institutionen und von Wirtschaftspolitik verhelfen. Aus der Kritik erwuchs eine mehrjährige Zusammenarbeit; deren Ergebnisse stellt das vorliegende Buch in populärwissenschaftlicher Form dar.

Zentrale Aussage der neuen Forschungsrichtung namens »Identitätsökonomie«: Anders als in der klassischen Wirtschaftswissenschaft dargestellt, lassen sich die Menschen nicht nur von ihren individuellen Vorlieben leiten, sondern ganz wesentlich auch von den Normen des sozialen Umfelds, dem sie sich zugehörig fühlen. Diese beiden Triebkräfte treten gelegentlich in Widerspruch zueinander; dann muss der Mensch abwägen, ob ihm die Befriedigung der eigenen Bedürfnisse oder die Bestärkung seiner »Identität« durch Erfüllung der Normen wichtiger ist. Der Erklärungsansatz unterscheidet sich grundsätzlich von dem traditionellen, nach dem der Mensch eine Norm nur befolgt, weil ihm ihre Einhaltung einen Nutzen und ihre Nichteinhaltung einen negativen Nutzen – in Form von Strafe – einbringt.

Die Grundaussage der Identitätsökonomie wird niemand bestreiten wollen, auch kein hartgesottener Mainstream-Ökonom. Welchen Erkenntnisgewinn die Ökonomie damit erzielen kann, ist zwar nicht unmittelbar einsichtig; aber

die Autoren demonstrieren das durch die Anwendung auf vier verschiedene Teilgebiete. Zwei davon seien durch Beispiele aus dem Buch erläutert:

➤ Ökonomen pflegen in der Arbeitswelt traditionell die leistungsabhängige Bezahlung zu empfehlen. Das gestaltet sich in der Praxis häufig schwierig, zum Beispiel weil sich Leistung in Teams schwer individuell zurechnen lässt oder weil die Zielkriterien nicht der komplexen Wirklichkeit entsprechen. Die Identitätsökonomie betont stattdessen die intrinsische Motivation: Man organisiere die Arbeit so, dass die Identifikation der einzelnen Beschäftigten mit den Zielen des Unternehmens gefördert wird.

➤ Nach der klassischen Theorie erzielen bestimmte Schultypen bessere Lernerfolge, weil die Schüler sich von dem Abschluss ein höheres Einkommen versprechen und die Schule sich bessere Lehrer und eine bessere Ausstattung leistet. Dagegen weiß die empirische Bildungsforschung anzuführen, dass verschiedene Schulen, die in dieser Hinsicht vergleichbar sind, höchst unterschiedliche Erfolge erzielen. Nach der Identitätsökonomie kommt es auch hier zuerst darauf an, dass die Schüler (und die Lehrer!) sich mit den Zielen ihrer Schule identifizieren.

Ähnliche Antworten gibt die neue Theorie zu den Themen geschlechtliche Diskriminierung am Arbeitsmarkt und Armut bei ethnischen Minderheiten.

Noch hat die Identitätsökonomie eine Außenseiterrolle. Aber die Autoren verweisen zu Recht darauf, dass auch andere Neuerungen in der Wirtschaftswissenschaft, die zu Anfang nicht ernst genommen wurden, heute dort zum Allgemeingut gehören: Markstrukturen jenseits von Monopol und vollständigem Wettbewerb, Marktergebnisse bei unvollständiger Information, individuelles Verhalten jenseits von reiner Rationalität. Um ihrem geistigen Kind zu einem ähnlichen Durchbruch zu verhelfen, geben sie ihm noch ein paar Ratschläge zur zukünftigen Forschung mit auf den Weg: mehr »Beobachtungen des Kleinen«, mehr Laborexperimente in der Ökonomie, wie zum Beispiel Reinhard Selten in Bonn und Ernst Fehr in Zürich sie etabliert haben.

Allerdings verbinden sie dieses überzeugende Plädoyer mit einer übermäßigen Skepsis gegenüber statistisch-ökonometrischen Untersuchungen: »Selbst bei einem ausgesprochen blödsinnigen Modell wird es kaum gelingen, seine Milliarden von Spezifikationen alle zu widerlegen.« Soweit damit die in den Wirtschaftswissenschaften gelegentlich anzutreffende Strategie gemeint ist, auf statistische Widerlegungen mit neuen Modellvarianten zu reagieren, kann man dem Vorwurf nur zustimmen. Allerdings schießen die Autoren damit über das Ziel hinaus, denn es muss immer beides geben: die Überprüfung theoretisch abgeleiteter Hypothesen und die Bildung von Theorien aus Fallstudien und Einzelbeobachtungen.

Fazit: Akerlof und Kranton präsentieren viele überzeugende Beispiele für die Relevanz von – häufig unausgesprochenen – Normen im sozialen Umfeld. Auf diese Weise stellen sie den überzogenen Anspruch mancher Ökonomen, auch soziale Phänomene auf ökonomische Anreize zurückführen zu können, überzeugend in Frage.

Das theoretische und empirische Material stammt überwiegend aus soziologischen Arbeiten, die bis in die 1960er Jahre zurückreichen und unter Soziologen heute vermutlich zum Allgemeinwissen gehören. Mit der Anwendung in der wirtschaftswissenschaftlichen Literatur betreten die Autoren gleichwohl Neuland – und demonstrieren nebenbei, dass Ökonomen und Verhaltenswissenschaftler, gelegentlichen interdisziplinären Versuchen zum Trotz, seit Jahrzehnten viel zu wenig miteinander reden.

Alles in allem ein mit Gewinn zu lesendes Buch, das auch dem Nichtökonomen nicht allzu viel an Vorkenntnissen abverlangt.

Markus Diehl

Der Rezensent ist Diplomvolkswirt und Analyst im Risikomanagement der WestLB AG; zuvor war er wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für Weltwirtschaft in Kiel.

DEMNÄCHST IM KINO

SCHILF

ALLES, WAS DENKBAR IST, EXISTIERT

Ein Film von Claudia Lehmann

NACH DEM BESTSELLER VON JULI ZEH

GEWINNEN SIE

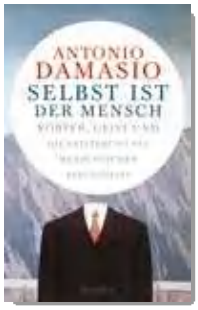
EINE REISE ZUM CERN

MIT WITTMANN TRAVEL.

MEHR INFOS UNTER

WWW.SCHILF.X-VERLEIH.DE

WWW.SCHILF.X-VERLEIH.DE



Antonio Damasio
Selbst ist der Mensch
Körper, Geist und die Entstehung des menschlichen Bewusstseins
Aus dem Amerikanischen von Sebastian Vogel. Siedler, München 2011. 368 S., € 24,99

NEUROWISSENSCHAFT

Geist + Selbst = Bewusstsein oder so

Antonio Damasio versucht, das menschliche Ich auf biologischer Basis zu erklären.

In seinem berühmt gewordenen Vortrag »Über die Grenzen des Naturerkennens«, die der Physiologe und Philosoph Emil Du Bois-Reymond 1872 vor der 45. Versammlung der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte in Leipzig hielt, erklärte er unter anderem, »dass nicht allein bei dem heutigen Stand unserer Kenntniss das Bewusstsein aus seinen materiellen Bedingungen nicht erklärbar ist, was wohl jeder zugiebt, sondern dass es auch der Natur der Dinge nach aus diesen Bedingungen nie erklärbar sein wird«. Er schloss seine Rede mit dem Ausspruch »Ignorabimus« – wir werden es niemals wissen.

Der Bilderraum (dunkel schattiert in Teil A) besteht aus Gehirnteilen, die Bilder erzeugen oder auch mit Bewegungen zu tun haben. Sie wirken wie Inseln im Dispositionsraum (dunkel schattiert in Teil B). Dieser lenkt die Bilderzeugung, ist aber nicht selbst daran beteiligt.

Von diesem ungeheuer einflussreichen Diktum lässt sich Antonio Damasio nicht anfechten. Der portugiesische, heute an der University of Southern California in Los Angeles lehrende Neurowissenschaftler unternimmt den kühnen Versuch, die Entstehung des Bewusstseins vor dem Hintergrund neuer Erkenntnisse der Hirnforschung zu entschlüsseln. Auch er hält den bewussten Geist für rätselhaft, aber im Gegensatz zu Du Bois-Reymond das Rätsel für lösbar.

Nach Damasio baut sich das menschliche Bewusstsein in drei Stufen auf. Die unterste, die er »Protoselbst« nennt, ist im Hirnstamm lokalisiert; es handelt sich um eine »integrierte Ansammlung verschiedener neuronaler Muster, die in jedem Moment die stabilsten Aspekte der physischen Struktur des Organismus kartieren«: eine neuronale Blaupause der inneren Struktur des Organismus. Diese »interozeptiven Karten« geben aber nicht nur den inneren Zustand des Körpers wieder, sie erzeugen auch »ursprüngliche Gefühle«, die allen anderen Gefühlen vorausgehen sollen. Mit dieser These geht Damasio ganz nebenbei von der Vorstellung ab, das menschliche Bewusstsein habe seinen ausschließlichen Sitz in der Großhirnrinde.

Auf der nächsten Stufe entsteht das »Kern-Selbst«, das sich vom Protoselbst insofern fundamental unterscheidet, als es erstmals über einen Protagonisten und somit über Subjektivität verfügt. Es entsteht, wenn das Protoselbst »durch eine Interaktion zwischen dem Organismus und einem Objekt verändert wird«. In der Folge richten sich verstärkt Verarbeitungsressourcen auf das Objekt, was man allgemein als »Aufmerksamkeit« bezeichnet. »Das Kern-Selbst entsteht dann durch Verknüpfung des abgewandelten Protoselbst mit dem Objekt, das für die Abwandlung gesorgt hat und jetzt durch Gefühl gekennzeichnet sowie durch Aufmerksamkeit verstärkt wurde.«

Die dritte und letzte Stufe, das »autobiografische Selbst«, entsteht, indem Erinnerungen als je einzelne Objekte »das Protoselbst abwandeln und einen Impuls des Kern-Selbst auslösen«. Dabei verfügt das Gehirn über verschiedene Hilfsmittel wie Thalamus und Claustrum, um die zahlreichen Erinnerungsobjekte zu koordinieren.

Damasio erkennt den Emotionen »als automatisch ablaufende, von der Evolution gestaltete Programme für Handlungen« eine herausragende Bedeutung beim Aufbau des Bewusstseins zu. Mit dieser bemerkenswerten These verschiebt er nicht nur den Ursprung des Bewusstseins auf physiologische Prozesse der Lebenssteuerung; er übernimmt auch, zumindest im Ansatz, die bahnbrechende Kognitionstheorie der chilenischen Neurobiologen und Konstruktivisten Humberto Maturana und Francisco Varela und bewegt sich so am Rande eines panpsychistischen Ansatzes mit all seinen verwickelten philosophischen Implikationen, die er aber nicht weiterverfolgt.

Leider sieht er das Gehirn, als Zentrum des »Lebensmanagements«, ledig-

lich als Produkt der Evolution mit der Funktion, die Chancen im Kampf ums Überleben zu maximieren. Dabei übersieht er, dass das Gehirn in Wahrheit ein »Luxusorgan« (Arthur Koestler) ist, wo doch die Evolution bekanntlich keinen Luxus, sondern lediglich Effizienz kennt. Er ignoriert somit auch all die Irrationalitäten, die mit dem Aufkommen des Bewusstseins einhergehen und im Kampf ums Überleben eher kontraproduktiv sind.

Darüber hinaus kann auch Damasio nicht im Ansatz die Frage beantworten – und hat nie ernsthaft für sich in Anspruch genommen, sie beantworten zu können –, die der australische Philosoph David Chalmers als »hard problem of consciousness« bezeichnet: Wie kann etwas Immaterielles wie Bewusstsein aus etwas Unbewusstem wie Materie entstanden sein?

Das Buch enthält zweifellos einige interessante Aspekte zur Entstehung des menschlichen Bewusstseins, ist aber auf weiten Strecken äußerst schwammig bis unwissenschaftlich formuliert (»Gefühle sind spontan gefühlte Bilder«). Hier zeigt sich einmal mehr, dass die Hirnforschung im Ganzen unter zwei fundamentalen Problemen leidet. Zum einen verfügt sie über eine äußerst beschränkte Methode, da sie lediglich zeigen kann, welche Gehirnregionen bei gewissen Handlungen aktiv sind, und keinerlei wirklichen Einblicke in ihr Untersuchungsobjekt hat. Zum anderen wird sie so lange an der Frage nach dem Ursprung des Bewusstseins scheitern, solange sie, wie auch Damasio, eine rein biologische Erklärung dieses Phänomens auf Basis eines materialistischen Reduktionismus ohne Einbeziehung systemischer Ansätze für möglich hält.

Du Bois-Reymond, der neben dem Bewusstsein auch die Frage nach dem ontologischen Status von Kraft und Materie für unlösbar hielt, war da bereits weiter, indem er den Gedanken äußerte, »ob die beiden Grenzen unseres Naturerkennens nicht vielleicht die nämlichen seien, d. h., ob, wenn wir das Wesen von Materie und Kraft begriffen, wir nicht auch verständen, wie die ihnen zu Grunde liegende Substanz unter bestimmten Bedingungen empfindet, begehrt und denkt«. In die Gegenwart projiziert: Ohne eine ontologische Neuausrichtung, welche die Materie so beschreibt, wie die Physik das seit fast 100 Jahren tut, nämlich als reine Beziehungsstruktur ohne materiellen Träger, wird die Modewissenschaft Hirnforschung sehr bald an ihre Grenzen stoßen, wenn sie diese nicht schon erreicht hat.

Eckart Löhr
Der Rezensent hat Philosophie und Literatur studiert; er ist Musiker und schreibt für diverse Onlinemagazine.

Stephen L. Macknik, Susana Martinez-Conde, Sandra Blakeslee
Die Tricks unseres Gehirns
Wie die Hirnforschung von den großen Zauberern lernt
Aus dem amerikanischen Englisch von Maren Klostermann. Kreuz, Freiburg 2011. 320 S., € 24,95. Videos zum Buch auf www.sleightsofmind.com/media/ (englisch)

HIRNFORSCHUNG

Die junge wilde Wissenschaft von der Zauberei

Zwei Neurowissenschaftler wissen spannende Neuigkeiten über die Illusionen mitzuteilen, die unser Gehirn erzeugt. Nur mit dem Aufschreiben hätten sie sich etwas mehr Zeit lassen sollen.

Unser Gehirn lässt sich unter bestimmten Bedingungen nicht nur relativ leicht täuschen; es erzeugt auch selbst ständig Illusionen, die von seinem Besitzer unbemerkt bleiben. Das beginnt beim sprichwörtlichen blinden Fleck in unserem Auge: Wir sehen nicht, dass wir an dieser Stelle der Netzhaut nichts sehen (können), da das Gehirn die Informationen der dort fehlenden Rezeptoren einfach auffüllt. Andere Täuschungen betreffen die höheren, kognitiven Ebenen des Denkens und des Bewusstseins.

Hirnforscher versuchen mit Hilfe dieser Mechanismen einen Blick hinter die neuronalen Kulissen unseres Denkorgans zu werfen; Zauberkünstler nutzen sie für ihre eigenen Zwecke. Da liegt es nahe, durch die Zusammenarbeit von Wissenschaft und Zauberkunst, von Dopamin und Merlin, nach neuen Erkenntnissen über die Funktionsweise des Gehirns zu streben.

Das ist das erklärte Ziel von Stephen L. Macknik, Chef des Laboratory of Behavioral Neurophysiology am Barrow Neurological Institute in Phoenix (Arizona), und seiner Ehefrau Susana Martinez-Conde, die das Laboratory of Visual Neuroscience am selben Institut leitet (siehe auch deren Artikel in Spektrum der Wissenschaft 12/2007, S. 54, und 6/2009, S. 44). Für das vorliegende Buch haben sie die Hilfe der Wissenschaftsjournalistin Sandra Blakeslee in Anspruch genommen.

Zahlreiche Anekdoten und Berichte von Besuchen bei Zauberfachkongressen, persönliche Interviews mit einigen der weltbesten Zauberkünstler und – als roter Faden – die einjährige Vorbereitung auf die Aufnahmeprüfung für

den renommierten Zauberclub des Magic Castle in Hollywood, die »Academy of Magical Arts and Sciences«, bilden das erzählerische Gerüst für das eigentliche Thema: die tricktechnischen und psychologischen Prinzipien der Zauberkunst sowie deren Verknüpfung mit dem Wissen der Forscher über die neuronalen und kognitiven Mechanismen unseres Gehirns.

Ein Beispiel: Das Phänomen der Aufmerksamkeitsblindheit ist in den letzten zehn Jahren vor allem durch das »Basketballexperiment« der Psychologen Daniel Simons und Christopher Chabris zu großer Popularität gelangt (Spektrum der Wissenschaft 8/2011, S. 96) und hat mittlerweile unzählige weitere Studien inspiriert. Mehr als die Hälfte aller Versuchspersonen übersehen beim Betrachten eines kurzen Videoclips von sechs Basketball spielenden Studenten einen weiteren Menschen, der in einem Gorillakostüm mitten durch das Bild geht – und zwar langsam. Dem vorinformierten Beobachter scheint es geradezu unglaublich, dass eine so große, auffällige Figur einfach unbemerkt bleibt – auch wenn ihm selbst wenige Minuten zuvor genau das passiert ist.

Das Wesentliche ist nicht die Geschwindigkeit, sondern zum einen die korrekte Choreografie der Spieler und zum anderen die verbale Anweisung des Versuchsleiters (»Zählen Sie bitte die Pässe der weiß bekleideten Mannschaft!«). Das ist für Zauberkünstler nichts Neues: Sie setzen den begleitenden Vortrag als eines der Hauptmittel ein, um die Aufmerksamkeit des Publikums von den notwendigen Trickhandlungen abzulenken.

Ein weiteres Kapitel bringt neurowissenschaftliche Erkenntnisse über die Wirkung von Gesten, Blickrichtung und Augenbewegungen zur Steuerung der Aufmerksamkeit und erläutert, wie ein Zauberkünstler sie einsetzt, wenn er scheinbar eine Münze oder gar einen ganzen Ball aus seiner Hand verschwinden lässt.

Hier bewegen sich die Autoren auf experimentell gesichertem Terrain, da sie die Ergebnisse der (noch spärlichen) Studien referieren, die Zaubertricks im Labor untersucht haben. Merkwürdigerweise haben sie selbst jedoch noch kein einziges Experiment auf dem – von ihnen laut Klappentext angeblich begründeten – Gebiet der »Neuromagie« veröffentlicht. Fast alle Zauberexperimente stammen von dem Psychologen und Amateurzauberkünstler Gustav Kuhn von der Brunel University in London. Seit 2005 untersucht er Zauberkunststücke im Labor durch Messung der Augenbewegungen (»eye-tracking«) und mit Hilfe der funktionellen Kernspintomografie (fMRI). Zudem haben bereits vor über 100 Jahren die Psychologen Norman Triplett und Joseph Jastrow eine Doktorarbeit beziehungsweise Theorieaufsätze über die Psychologie der Zauberkunst in Fachjournalen veröffentlicht.

Im weiteren Verlauf des Buchs diskutieren Macknik und Martinez-Conde hauptsächlich weitere Erkenntnisse der Hirnforschung und interessante Verbindungen zu den Methoden der Zauberkunst – darunter das Phänomen der falschen Erinnerungen, die Neigung unseres Gehirns zu impliziten Annahmen und kognitiven Verzerrungen sowie die Mitte der 1990er Jahre bei Experimenten mit Affen entdeckten Spiegelneurone, deren Existenz beim Menschen in der Fachwelt allerdings noch umstritten ist.

Auf die übliche Frage »Wozu ist das nutze?« führen die Autoren die Aussicht auf einen Früherkennungstest für Autismus an, der auf Zaubertricks beruht. Dem liegt die Hypothese zu Grunde, autistisch veranlagte Menschen seien auf Grund ihrer Defizite in der zwischenmenschlichen Kommunikation weniger empfänglich für die Ablenkungsmethoden der Zauberkünstler und müssten daher viel leichter deren Tricks durchschauen. Das klingt plausibel, nur ist bei einer ersten Studie dazu – ebenfalls von Gustav Kuhn – das genaue Gegenteil herausgekommen, was die Autoren mit keinem Wort erwähnen: Die autistischen Kinder waren leichter abzulenken und durchschauten das Kunststück weniger oft als ihre gesunden Altersgenossen.

Da es auf diesem jungen Gebiet erst sehr wenige echte Experimente gibt, bleiben viele Vermutungen hochspekulativ. Noch weiß niemand, ob der Mensch unter der Wirkung des Bindungshormons Oxytozin leichter ablenkbar ist oder ob er dank seiner Spiegelneurone eine Zaubervorstellung besser genießen kann, wenn er zuvor einige wenige Tricks erlernt hat.

Simons und Chabris haben ihr Buch erst zehn Jahre nach ihrer Basketballstudie geschrieben. Der ebenfalls zitierte Daniel Kahneman, gemeinsam mit Amos Tversky Begründer der Verhaltensökonomie, hat sich seit seinen bahnbrechenden Forschungen (Spektrum der Wissenschaft 3/1982, S. 89) immerhin 30 Jahre Zeit gelassen, bis er jüngst seine Erkenntnisse in dem populärwissenschaftlichen Buch »Thinking, Fast and Slow« niederlegte. Auch das vorliegende Buch wäre vielleicht besser zu einem späteren Zeitpunkt veröffentlicht worden, mit weniger Anekdoten, dafür aber mehr inhaltlicher Stringenz und wissenschaftlicher Substanz. Außerdem hätte der deutschen Ausgabe das Gegenlesen durch einen Zauberkünstler gutgetan, um zahlreiche sinnentstellende Übersetzungsfehler von Fachbegriffen aus der Zauberkunst zu vermeiden.

Auf Grund seiner amorphen Mischung aus wissenschaftlichen Erklärungen, persönlichen Anekdoten und Lebensratschlägen ist das Buch nur bedingt empfehlenswert. Darüber hinaus sind die Behauptungen über die psychologischen und neuronalen Grundlagen von Zaubertricks mit Vorsicht zu genießen.

Es wäre schon eine seltsame, selbstbezügliche Ironie, wenn der Leser eines Buchs über wissenschaftliche Erklärungen von Illusionen selbst einer solchen erliegen würde.

Thomas Fraps

Der Autor ist Diplomphysiker und stellt als professioneller Zauberkünstler seit 17 Jahren erfolgreich (fast) alle Naturgesetze auf den Kopf, die er im Studium erlernt hat. Eine Kostprobe seiner Kunst finden Sie unter: www.spektrum.de/zauberei

Claudia Lehmann (Regie)
Schilf
Alles, was denkbar ist, existiert
Nach dem Roman »Schilf« von Juli Zeh
Mit Stipe Erceg, Mark Waschke
und Bernadette Heerwagen
X-Verleih, Berlin. 90 Minuten,
Kinostart: 8. März 2012

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

PHYSIKERSPIELFILM

Konfusion in parallelen Welten

Ein Krimi lebt davon, die Frage »Wer war's?« möglichst schwierig zu stellen und kunstvoll zu lösen. Im Multiversum sind alle Fragen noch viel schwieriger – aber der Krimi ist dadurch nicht besser geworden.

Der Spielfilm »Schilf« wagt es, zwei Physiker zu präsentieren, die darüber streiten, wie man die Quantenphysik verstehen soll. Sebastian vertritt in seinen Vorlesungen an der Universität Jena die Vielweltentheorie, wonach alles quantenmechanisch Mögliche in Parallelwelten realisiert ist. Oskar arbeitet am CERN bei Genf und hält überhaupt nichts von den Spekulationen seines Freundes – unter anderem mit dem ziemlich komischen moralischen Einwand, im Multiversum wäre jedes Verbrechen erlaubt, weil es nur in einer einzigen unter unzähligen Welten begangen würde.

Die Regisseurin Claudia Lehmann kennt die im Film gezeigte Arbeitswelt; sie hat am Deutschen Elektronensynchrotron (DESY) promoviert und ist erst danach übers Theater zum Film gelangt. Das Drehbuch beruht auf einem Roman von Juli Zeh; deren Namensgleichheit mit dem Theoretiker H. Dieter Zeh, einem prominenten Verfechter der Vielweltentheorie, ist allerdings purer Zufall.

Roman wie Film wollen eine extra spannende Story erzählen und pfropfen darum der Physikerdebatte eine Krimihandlung auf: Das Kind des einen Physikers wird entführt, und er begeht einen Mord – oder doch nicht? Wer ist der alte Mann, der plötzlich auftaucht? Ist er am Ende gar der CERN-Physiker, dem es gelungen ist, durch ein Wurmloch aus der Zukunft in die frühere Parallelwelt zurückzukehren und die Tat des Freundes ungeschehen zu machen?

Das ist natürlich reichlich abstrus. Wie im Film selbst einmal gesagt wird, bezieht sich das Vielweltenkonzept auf die Mikrophysik; im Alltag tänzeln wir nicht durch parallele Wirklichkeiten. Für eine Krimihandlung, die ja immer nach der Alltagslogik der Tat sucht, ist ein plötzlicher Weltentausch ebenso störend wie ein Deus ex Machina, der mit göttlicher Macht ins Geschehen pfuscht. Die mit wackelnder Handkamera konventionell aufgebaute Spannung verpufft. Der Zuschauer fühlt sich düpiert.

Das Resultat ist ein Zwitter: halb ein Film über Physiker, halb ein Whodunit ohne Auflösung. Hätte die Regisseurin nur den Mut gehabt, von Physikern zu erzählen, die sich über die Paradoxien der Quantenmechanik den Kopf zerbrechen! Auch solche Leute haben ein Privatleben. Sie wollen Karriere machen, vielleicht intrigieren sie, vielleicht manipulieren sie Daten, verlieben sich in die Frau des Freundes, begehen meinetwegen ein Gewaltverbrechen. Das wäre mir spannend genug, ganz ohne die Konfusion mit vielen Welten.

Michael Springer
Der Rezensent ist Physiker und ständiger Mitarbeiter bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Maike (Bernadette Heerwagen) und der gemeinsame Sohn Nick (Nicolas Treichel) verlassen Sebastian.

Millionen Jahre alte Bakterien?

»Aus Zechsteinsalze(n), wie sie bergmännisch oder mit Hilfe von Tiefbohrungen gewonnen werden, gelang es, lebende Bakterien zu isolieren. Es wäre durchaus denkbar, daß die Bakterien beim Eintrocknen des Zechsteinmeeres in einem wasserfreien Zustand in dem Salz eingeschlossen wurden und daß sie sich auf diese Weise ihre Lebensfähigkeit bis heute bewahren konnten. Stimmen diese Überlegungen, dann müßte es auch gelingen, lebende Bakterien aus Salzen zu isolieren, die noch älter sind als die vor 180 Millionen Jahren entstandenen Zechsteinsalze.« Kosmos, März 1962, S. 130

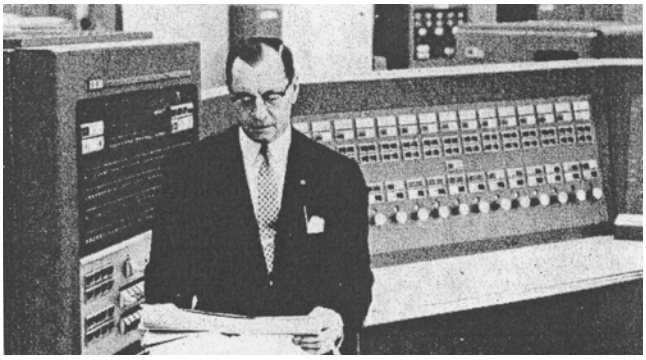
Warnung vor Tsunamis

»Ein Fernmeldekabel zwischen Hawaii und dem amerikanischen Festland soll jetzt vor Tsunamis warnen. Vor zwei Jahren kamen bei einer solchen Naturkatastrophe auf Hilo neunzig Personen ums Leben. Das über 6.000 km lange Tiefseekabel wird mit Druckmessern versehen, danach wieder abgelassen. Die Messgeräte stellen die Wellenhöhe durch die Druckänderung unter der Meeresoberfläche fest.« Populäre Mechanik, März 1962, S. 9

1962

Die Referatmaschine

»Viele Autoren empfinden es als schwieriger, ein 20-Zeilen-Referat ihrer Arbeit zu machen, als die Arbeit selbst zu schreiben. Die IBM 704 ist darauf eingestellt, die am meisten vorkommenden Worte aufzufinden, die Sätze festzustellen, in denen diese Worte am öftesten und am nächsten beieinander vorkommen, und schließlich diese Sätze zu extrahieren.« Elektronik, März 1962, S. 65

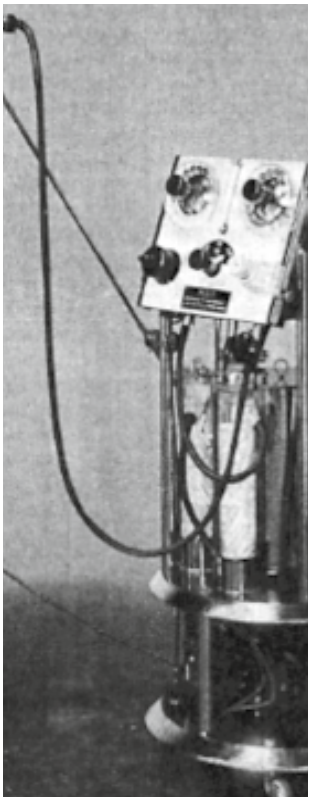


Die IBM 704 verarbeitete wissenschaftliche Artikel.

1912

Vom Wetter und Gemüt

»Allgemein herrscht die Ansicht, daß das Wetter einen Einfluß auf den Organismus ausübt. Prof. W. Trabert von der Wiener Meteorologischen Zentralanstalt hat über diese Fragen exakte wissenschaftliche Untersuchungen angestellt. Es zeigt sich, daß jene Tage physiologisch als schlecht empfunden werden, an denen ein Tiefdruckgebiet die Situation beherrschte oder im Anrücken begriffen war. Als gut werden Tage berechnet, an denen hoher Druck über dem Gebiet lagerte oder das Barometer stieg.« Die Umschau in Wissenschaft und Technik, März 1912, S. 230



Heilsame Brise

»Wie schnell in den Tropen auch die bösesten Wunden heilen, ist allgemein bekannt. Der wirksame Faktor kann nur die grosse Trockenheit sein, und wirklich lehrt die Erfahrung, dass wenige Bakterien in trockener Luft leben können. Professor Dr. R. Kutner, der Leiter des Kaiserin-Friedrich-Hauses in Berlin, hat nun eine Vorrichtung angegeben und in seiner Praxis benutzt. Der Apparat enthält einen Elektromotor, der einen Ventilator betreibt. Der angesaugte Luftstrom geht in die oben angebrachte Batterie von Trockenflaschen. Die erste enthält flüssiges Paraffin zwecks Reinigung der angesaugten Luft, die zweite und dritte geglühten und mit Schwefelsäure getränkten Bimsstein und die vierte und fünfte Ätzkalk oder Ätznatron. Der Platz für eine sechste Flasche gewährt die Möglichkeit, durch Verdampfung medikamentöser Stoffe einen therapeutischen Effekt zu erteilen. Für Haut- und Wundbehandlung kommen duschenartige Düsen zur Anwendung, während Inhalationen mit Hilfe von Masken und Glasansätzen ausgeführt werden können.«

Prometheus 1170, März 1912, S. 407

Lufttrockner für die Wundheilung

FOTOS AUS ZEITSCHRIFTEN DER FORSCHUNGSBIBLIOTHEK FÜR WISSENSCHAFTS- UND TECHNIKGESCHICHTE DES DEUTSCHEN MUSEUMS

Der erste Frühling der Elektromobilität

BEIDE FOTOS: DEUTSCHES MUSEUM

Dieser Baker Electric »Queen Victoria« wurde in den 1980er Jahren aufwändig restauriert. Dabei erhielt er als Dekor das Wappen des Königs von Siam, der einst ebenfalls ein solches Fahrzeug besaß.

Eine Imageanzeige des Unternehmens von 1912 präsentierte den Baker Electric Coupé als respektables Fahrzeug für jedermann. Elektrowagen galten gemäß gängiger Rollenmuster sogar als für Frauen besonders geeignet.

Elektroautos sind keine Erfindung unserer Tage. Um 1900 galten sie insbesondere in den USA als viel versprechende Option für den Individualverkehr. Dort wurden in jenem Jahr etwa 4200 davon gebaut, knapp ein Drittel aller Fahrzeuge besaßen einen elektrischen Antrieb. Als »The standard of electric vehicles« und »The automobile without repair bill« bewarb die 1899 in Cleveland, Ohio, gegründete Baker Motor Vehicle Company ihre Produkte. Die Wagen seien einfach und zuverlässig, leise und abgasfrei.

Aus dem Jahr 1908 stammt auch der Baker Electric »Queen Victoria« (siehe Foto) mit so genannter Phaetonkarosserie – ähnlich einer offenen Kutsche. Der Zweisitzer wurde von einem Gleichstrommotor mit einem Kilowatt Leistung angetrieben; er befand sich unter dem Wagenkasten beziehungsweise dem Karosserieaufbau. Den Strom lieferten je vier Batterien mit insgesamt 48 Volt, die paarweise vorn und hinten montiert waren. Die Batterien konnten an der hauseigenen Ladestation oder in einer Servicegarage aufgeladen werden. Zur Steuerung diente ein Lenkhebel; sechs verschiedene Geschwindigkeiten ließen sich über einen weiteren Hebel links neben dem Fahrersitz anwählen. Die Bremsen betätigte der Fahrer über Fußpedale. Laut Firmenwerbung sollte eine Batterieladung für eine Reichweite von 80 bis 100 Kilometer sorgen, tatsächlich waren es nur etwa 50 Kilometer.

Doch das genügte den Bedürfnissen vieler Käufer, die dafür ein leicht zu bedienendes, emissionsarmes Auto erhielten – ein Vorteil gegenüber den lärmenden und mitunter komplizierten Benzinwagen, die damals noch angekurbelt werden mussten. Je nach Ansprüchen gab es noch andere Modelle, wie zum Beispiel das Baker Electric Coupé von 1912 (siehe Anzeige oben rechts). Elektroautos fanden auch in den gehobenen Gesellschaftsschichten Freunde. Ein »Queen Victoria« gehörte um 1905 beispielsweise zum Fuhrpark des amerikanischen Präsidenten. Einer der ersten Käufer der Baker-Wagen war Thomas Alva Edison, der große Hoffnungen auf die Automobilbranche als Abnehmer von Elektroprodukten setzte. So brachte er 1904 eine Nickel-Eisen-Batterie auf den Markt, die besser zu handhaben, vor allem aber leichter war als die bis dahin übliche Bleibatterie.

Solche Batterien wurden auch in den Baker-Fahrzeugen verbaut. Die Motoren bezog das Unternehmen zunächst von der auf elektrische Antriebe spezialisierten Firma Elwell-Parker in Cleveland, dann von General Electric, jenem Elektroriesen, der 1892 aus einer Fusion der Edison General Electric Company mit ihrem größten Konkurrenten, der Thomson-Houston Electric Company, hervorgegangen war.

Die Hoffnungen der Elektrobranche erfüllten sich jedoch nicht. Die Batterien waren zu schwer, ihre Kapazitäten jedoch zu gering. Dagegen waren Benziner immer zuverlässiger und komfortabler. Ab 1909 eroberte Fords Model T den amerikanischen Markt, das erste am Fließband gefertigte und für breite Bevölkerungsschichten erschwingliche Automobil mit Verbrennungsmotor. Zudem entstand eine automobile Kultur, die sich insbesondere in Europa bald am Ideal von »Abenteuermaschinen« und »Rennreiselimousinen« orientierte. Der erste Boom der Elektroautos im Pkw-Sektor endete, kaum dass er begonnen hatte. Um 1909 sollen etwa 4000 solcher Fahrzeuge in den USA verkauft worden sein – gegenüber geschätzten 80 000 Benzinern. Eine Nische fanden elektrische Antriebe immerhin noch eine Weile bei Nutzfahrzeugen.

Die promovierte Historikerin **Bettina Gundler** ist Kuratorin für den Straßenverkehr im Deutschen Museum.

Wege zur Quantengravitation

Sie ist die letzte große Lücke im Gebäude der modernen Physik: eine Theorie, die Quantenphysik mit Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie vereint. Claus Kiefer von der Universität Köln zeigt die Wege, wie Forscher das Problem lösen wollen, die Mikrowelt mit der Schwerkraft zu verschmelzen

MPI FÜR GRAVITATIONSPHYSIK / MILDE SCIENCE COMMUNICATION

OLIVER MUNDAY

Smart Cities

Die Zukunftsvision zweier Städteplaner: Kommunikations- und Sensornetzwerke ermöglichen neue Formen der Geselligkeit und fördern das innovative Potenzial der Einwohner

CLAUDIA HINZ

Leuchtende Heiligenscheine

Glorien zählen zu den schönsten atmosphärischen Phänomenen – und sie haben eine überraschend komplexe Erklärung. Indem sie die »Heiligenscheine« erforschen, lernen Wissenschaftler auch immer mehr über den Einfluss von Wolken auf den Klimawandel

Sprache formt das Denken

Nicht nur die Orientierung im Raum und in der Zeit hängt von der verwendeten Sprache ab – auch Verwandtschaft, Zahlenangaben und woran wir uns wie genau erinnern. Sogar Vorurteile einer Person variieren je nachdem, ob diese etwa arabisch oder hebräisch spricht

Zukunft der Stromspeicher

Wenn das Öl zur Neige gegangen ist, wird Mobilität nur noch mit nichtfossilen Speichern möglich sein. Hochleistungsakkus, wie wir sie heute schon in Laptops und Handys einsetzen, sollen in den kommenden Jahren auch Hybrid- und Elektrofahrzeuge bewegen. »Spektrum« wirft einen Blick auf die weitere Entwicklung dieser Technik

SPEKTRUM-NEWSLETTER

Möchten Sie regelmäßig über die Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?

Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:
www.spektrum.com/newsletter

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Gesellschaft 3.0

Die vernetzte Stadt

Smartphones und Apps machen unser Zusammenleben kreativer

APRIL 2012

Spektrum DER WISSENSCHAFT 4/12

KOGNITION
Wie Sprache das Denken prägt

STROMVERSORGUNG
Speichertechnologien für die Energiewende

EVOLUTION
Kultursprung durch Großeltern

Quantengravitation

Die Suche nach der Weltformel

7,90 € (D/A) · 8,50 € (L) · 14,– sFr.
D6179E

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

www.spektrum.de

Unsere Neuerscheinungen

epoc 1/2012

»*ROM – IMPERIUM DER INGENIEURE*«

Gewaltige Gebäude, noch heute existierende Brücken, ein ausgeklügeltes Fernstraßensystem und Herstellungsverfahren auf höchstem Niveau: **epoc**, das Magazin für Archäologie, Geschichte und Kultur, befasst sich in seiner aktuellen Ausgabe mit den herausragenden Leistungen römischer Ingenieure, Techniker und Handwerker. Aus dem Inhalt:

> Das römische Verkehrsnetz: Hunderttausend Kilometer Straße
> Thermen: Badekultur dank effizienter Heiztechnik
> Aquädukte: Die hohe Kunst der Landvermesser
> Schlüsseltechnologie: Die ausgeklügelten Schließsysteme der Römer

epoc kostet € 7,90 als Einzelheft und ist auch im Abonnement für € 27,– (4 Ausgaben pro Jahr) inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 23,–) zu beziehen.

Gehirn&Geist Basiswissen 5:

»*DIE VERMESSUNG DER SEELE*«

Psychologie und Hirnforschung sind Wissenschaften mit kurzer Geschichte, aber langer Vergangenheit. In diesem Sonderheit, dem fünften Teil unserer Serie **Basiswissen**, präsentieren wir die besten G&G-Beiträge über Pionierleistungen aus fünf Jahrhunderten: Begleiten Sie Künstler, Gelehrte und Forscher bei ihren Erkundungen des menschlichen Geistes. Themen der Ausgabe sind unter anderem:

> Innenansichten des Seelenorgans
> Das Gehirn ist ein Irrtum
> Einblicke in die Dynamik des Denkens
> Hirnforschung und Psychologie – eine schwierige Beziehung

Das neue Basiswissen kostet € 8,90 zzgl. Versand und erscheint am 27.3. 2012. Alle Hefte der Reihe können auch unter www.gehirn-und-geist.de/basiswissen bezogen werden.

Die Hefte sind im Handel erhältlich oder unter:

Spektrum DER WISSENSCHAFT
WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

online: spektrum.de/lesershop
E-Mail: service@spektrum.com
Tel.: +49 6221 9126-743

Fax: +49 6221 9126-751
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg

Carsten Könneker
Chefredakteur
koenneker@spektrum.com

Auf der Suche nach der Weltformel

Auch die nüchternsten Physiker sind mitunter begeisterungsfähig wie kleine Kinder. Beim Betrachten der maxwellschen Gleichungen etwa geraten viele von ihnen ins Schwärmen. Mit diesen Formeln hatte der Schotte James Clerk Maxwell Anfang der 1860er Jahre das Kunststück vollbracht, zwei unterschiedliche Naturkräfte, Magnetismus und Elektrizität, elegant in einer gemeinsamen Theorie zu beschreiben. Seither versuchen seine Nachfolger, die verbliebenen vier Fundamentalkräfte – Elektromagnetismus, starke und schwache Kernkraft sowie Gravitation – nach Maxwells Vorbild als Spielarten einer einheitlichen Kraft zu erklären. Tatsächlich gelang es dem Amerikaner Sheldon Lee Glashow 1960, die elektromagnetische und die schwache Kernkraft zusammen zu fassen; das Standardmodell der Elementarteilchen, das in den 1970er Jahren Gestalt annahm, integriert zusätzlich die starke Kernkraft.

Einzig die Gravitation, vor beinahe 100 Jahren von Albert Einstein in seiner allgemeinen Relativitätstheorie als Geometrie der Raumzeit gedeutet, entzieht sich nach wie vor den Versuchen der Forscher, mit den anderen drei Fundamentalkräften gemeinsam verstanden zu werden. Bereits Einstein selbst scheiterte am Versuch, die »Weltformel« zu finden, und bis heute beißen sich die Forscher die Zähne daran aus. Würden sie auf der Suche nach einer schlüssigen, empirisch überprüfbaren Theorie der Quantengravitation fündig, wäre damit die wohl größte Suchaktion in der Geschichte der theoretischen Physik zu einem glücklichen Ende gebracht.

Immerhin gibt es bereits einige ernst zu nehmende Kandidaten für eine vereinheitlichte Theorie, welche die allgemeine Relativitätstheorie mit der Quantentheorie verbindet. Sie tragen Namen wie Quantengeometrodynamik, Schleifenquantentheorie, dynamische Triangulation und asymptotische Sicherheit. Wirklich umfassend im Sinne eines alle vier Fundamentalkräfte vereinenden Modells ist zudem die Stringtheorie, die allerdings einige mathematisch notwendige Überraschungen bereithält – etwa eine zehn- oder elfdimensionale Raumzeit. Ob man derlei Konzepte je experimentell wird überprüfen können? Der Kölner Physiker Claus Kiefer stellt die wichtigsten Ansätze auf dem Weg zu einer »Theorie von allem« ab S. 34 vor und erörtert ihre jeweiligen Stärken und Schwächen.

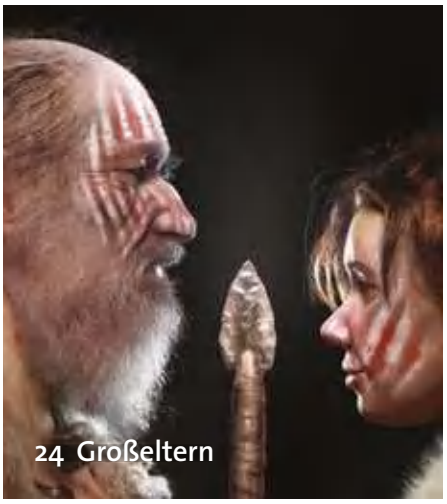
Eine anregende Lektüre wünscht
Ihr

AUTOREN IN DIESEM HEFT

Die Paläoanthropologin **Rachel Caspari** erforscht das Leben der Menschen in der jüngeren Altsteinzeit. Sie fragt, wie alt Neandertaler und moderne Menschen in verschiedenen Phasen ihrer Existenz wurden – und seit wann drei Generationen gleichzeitig lebten (S. 24).

Die Psychologin **Lera Boroditsky** untersucht, wie unterschiedliche Sprachen das Denken prägen. Eine Fülle von Indizien zeigt, dass sprachliche Strukturen unsere Raum- und Zeitwahrnehmung sowie Erinnerungen und (Vor-)Urteile beeinflussen (S. 30).

Der Physiker **Claus Kiefer** wagt sich ab S. 34 an eine der größten Fragen seines Fachs: Können wir Quantentheorie und allgemeine Relativitätstheorie in einer gemeinsamen Theorie fassen?


24 Großeltern

72 Energiespeicher

52 Évariste Galois und endliche Körper

62 Urbane Netzwerke

BIOLOGIE & MEDIZIN

▸ **24 Kultursprung durch Großeltern**
Rachel Caspari
Erst sehr spät in unserer Evolution lebten drei Generationen nebeneinander – im Jungpaläolithikum. Dienten Oma und Opa als Motor für die kulturelle Entwicklung des modernen Menschen?

▸ **30 Wie die Sprache das Denken formt**
Lera Boroditsky
Menschen leben in unterschiedlichen Kulturen und sprechen die verschiedensten Sprachen. Deren Strukturen prägen die Art und Weise, wie wir die Welt wahrnehmen – in ungeahntem Ausmaß!

PHYSIK & ASTRONOMIE

TITELTHEMA
▸ **34 Quantengravitation**
Claus Kiefer
Seit Jahrzehnten ringen Physiker darum, die Gravitation mit der Quantenphysik zu vereinigen. Was ist der Stand der Dinge?

SCHLICHTING!
44 Licht im Schatten
H. Joachim Schlichting
Der Strahlenkranz eines Axicons scheint sogar einen Schatten durchdringen zu können

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN
46 Die Ente muss raus!
Thomas Rubitzko
Loriots unsterblicher Sketch von den Herren im Bad, physikalisch neu erzählt

MENSCH & KULTUR

52 200 Jahre Évariste Galois
Antoine Chambert-Loir
Von der Mitternachtsformel über die Gruppentheorie und endliche Körper bis zur Kryptografie – der Geniestreich eines kaum 20-Jährigen hat die Mathematik umgewälzt und wirkt bis heute fort

Gesellschaft 3.0
▸ **62 Die smarte Stadt**
Carlo Ratti und Anthony Townsend
Konzepte für die Stadt der Zukunft sollten Smartphones und soziale Netze miteinbeziehen: Denn diese liefern oft mehr Informationen als fest installierte Sensoren und fördern obendrein die Kreativität der Bürger

34
TITELTHEMA

Quantengravitation

Die Suche nach der Weltformel

TECHNIK & COMPUTER

SERIE: DIE ZUKUNFT DER ENERGIE

ERDE 3.0

▸ **72 Energiespeicher**
Ferdi Schüth
Wind, Wasserkraft und Sonnenenergie schwanken in ihrer Leistung erheblich. Wenn ihr Anteil am Energiemix steigt, wird es schwieriger, das Elektrizitätsnetz stabil zu halten. Hochleistungsfähige Energiespeicher könnten helfen, die Stromspitzen aufzufangen, um Angebot und Nachfrage im Netz anzugleichen

SONDERTEIL NACH SEITE 80

Herausforderung Klimawandel
• Wie hart trifft es Deutschland?
• Städte im Treibhaus
• Besserer Küstenschutz
• Climate Engineering als letzte Rettung?

Titelmotiv: MPI für Gravitationsphysik / Milde Science Communications [M]

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▸ gekennzeichnet

SPEKTROGRAMM

8 Rasende Diamanten • Springspinnen • Schutzpanzer gegen Piranhas • Langlebiges Mondmagnetfeld • Krebsmedikament kuriert Alzheimer • Superfolie lässt nur Wasser durch

BILD DES MONATS

11 Winzling mit Schuppen

FORSCHUNG AKTUELL

12 Supernova aus zwei Zwergen
Vorläufer einer Sternexplosion identifiziert

15 Der Sprung der Eidechse
Steuerung mit dem Schwanz

18 Ein Sudoku benötigt mindestens 17 Vorgaben
Eine Vermutung wurde Gewissheit

20 Dialog Mensch – Maschine
Tastempfindungen per Computer

22 Springers Einwürfe
Wissenschaftspublikation im Umbruch

WEITERE RUBRIKEN

3 Editorial

6 Leserbriefe/Impressum

81 Rezensionen
F. Vahrenholt et al.: Die kalte Sonne
H. Johnson: Bäume
Worldwatch Institute (Hg.): Zur Lage der Welt 2011
S. Bär: Der Untergang des Hauses Rascher
A. Stanton (Regie): John Carter; u. a.

92 Wissenschaft im Rückblick
Vom *Triceratops*-Schädel zum Weltraumkeim

93 Exponat des Monats
Die Laufmaschen-Hebemaschine

94 Vorschau

PIETER BRUEGEL DER ÄLTERE, TURMBAU ZU BABEL, 1563 / PUBLIC DOMAIN

Grenzen der Physik

Der Physiker Tony Rothman kritisierte seine Disziplin, die fundamentale Fragen auf altbekannten Forschungsgebieten nicht beantwortet hätte. (»Die Physik – ein baufälliger Turm von Babel«, Februar 2012, S. 61)

Prof. Dr. Wolfgang Kinzel, Würzburg: Tony Rothmans Kritik an den Physikvorlesungen mag für das »Undergraduate«-Studium an seiner Universität in Princeton/USA zutreffen, aber für das Physikstudium an unserer Fakultät in Würzburg – und sicherlich überall in Deutschland – gilt das nicht.

Unsere Studentinnen und Studenten lernen, dass Physik keinen absoluten Wahrheitsanspruch hat, sondern auf Hypothesen beruht, die zwar experimentell äußerst gut bestätigt wurden, die jedoch immer wieder kritisch hinterfragt und gegebenenfalls erweitert oder sogar ersetzt werden müssen. In den Vorlesungen wird keinesfalls verschwiegen, dass Physiker trotz universeller Gesetze auf Näherungen angewiesen sind, um diese Gesetze auf komplexe Systeme anzuwenden. Schwierigkeiten mit der Interpretation und dem anschaulichen Verständnis der Quantenmechanik, mit der Herleitung der statistischen Mechanik und ungelöste Problem werden offen angesprochen. Rothmans Vorwürfe zu Schmutz, Schwindel, Unredlichkeit, ja sogar Betrügereien bei der Vermittlung der Physik sind daher haltlos.

Selbstverständlich verwenden wir nicht den Großteil unserer Vorlesungen, um ungelöste Probleme zu diskutieren. Wir wollen unsere Studierenden dafür begeistern, dass es einen Teil unserer Natur gibt, für den wir eine Vielzahl von messbaren Phänomenen durch einige wenige mathematische Gesetze erklären können. Wir verschweigen aber auch nicht, dass die Physik (noch?) keine Lösung zu einem großen Teil unserer Natur liefert.

Obwohl also die harte Kritik von Tony Rothman für unser Physikstudium nicht zutrifft, hat sein Aufsatz an unserer Fakultät unter Studenten und Dozenten zu einer lebhaften Diskussion geführt. Brauchen wir mehr Erkenntnis- und Wissenschaftstheorie im Physikstudium? Wird zu viel gerechnet und zu wenig verstanden? Müssen die Schwierigkeiten und Grenzen der Physik stärker betont werden? Sollen lösbare Probleme in den Übungen reduziert und mehr Wert auf Näherungsmethoden gelegt werden? Solche Diskussionen sind ein erfreulicher Effekt des Aufsatzes von Rothman, der damit zur ständigen Verbesserung des Physikstudiums beiträgt.

Herbert Kern, Dogern: Ein wohltuender Beitrag zum Zustand der Physik. Neue Entdeckungen werden meist mit dem Titel »Eine der letzten Fragen der Welt ist beantwortet …« angekündigt, dabei sind viele grundlegende Fragen noch völlig offen. Dem Autor ist es hervorragend gelungen, den Physikern eine neue Bescheidenheit zu verordnen.

Gilbert Brands, Krummhörn: Wenn sich der Autor einmal klarmachen würde, dass es jenseits unserer körperlichen Sensorik (Augen, Ohren und so weiter) nichts gibt, was wir als Menschen im philosophischen Sinn »verstehen« kön-

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.)
Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser (Monatshefte), Dr. Gerhard Trageser (Sonderhefte)
Redaktion: Thilo Körkel (Online-Koordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke
E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Editor-at-Large: Dr. Reinhard Breuer
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Redaktionsassistenz: Anja Albat-Nollau
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114
Verlagsleiter: Richard Zinken
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Andrea Jungbauer, Christine Kemmet, Dr. Michael Springer

Leser- und Bestellservice:
Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung:
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 7,90 (D/A) / € 8,50 (L) /sFr. 14,–; im Abonnement € 84,– für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Die Preise beinhalten € 8,40 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 8,40 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e.V. erhalten SdW zum Vorzugspreis.
Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Bereichsleitung Anzeigen: Marianne Dölz; Anzeigenleitung: Marco Buch, Tel. 0211 887-2483, Fax 0211 887 97-2483; verantwortlich für Anzeigen: Christian Herp, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887 2481, Fax 0211 887-2686
Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 33 vom 01.01. 2012.
Gesamtherstellung: L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2012 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
75 Varick Street, New York, NY 10013-1917
Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven Inchcoombe, Vice President, Operations and Administration: Frances Newburg, Vice President, Finance, and Business Development: Michael Florek, Managing Director, Consumer Marketing: Christian Dorbandt, Vice President and Publisher: Bruce Brandfon

Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

nen, hätte er nicht diese Probleme. Alle so genannten Erklärungen für Phänomene sind Projektionen in unsere sensorische Welt und haben daher mit ursächlicher Erklärung nichts zu tun.

Die Physik will nichts erklären. Ihre Aussage besteht mehr oder weniger in Sätzen wie diesem: »Wenn du unter diesen Randbedingungen diesen Schalter umlegst, schlägt das Messgerät dort hinten bis zur Marke 5 aus.« Unter Einhaltung der Randbedingungen funktioniert die Physik ausgezeichnet. Die Mathematik ist für die Systematik zuständig, nicht für Erklärungen. Und auch das funktioniert ausgezeichnet.

Ich weiß nicht, warum der Autor die Physik offensichtlich auf das Niveau einer Geisteswissenschaft herunterziehen will, die schon einen völlig anderen Theoriebegriff besitzt (in den Naturwissenschaften dient eine Theorie zur Voraussage, in den Geisteswissenschaften in der Regel zur nachträglichen Begründung). Stört es ihn, dass es noch Wissenschaften gibt, deren Berechnungen und Vorhersagen in der Praxis eintreffen?

Kostenfrage

Matthias Popp stellte eine spezielle Form von Pumpspeicherkraftwerken zur Energiespeicherung vor. (»Ringwallspeicher für die Energiewende«, Februar 2012, S. 84)

Walter Weiss, Kassel: Leider sind die Riesenkosten, die diese Fantasiegebilde des Verfassers auslösen würden, absolut ungerechtfertigt, wenn man ganz simple andere Möglichkeiten gegenüberstellt, die sofort ohne nennenswerten Aufwand praktiziert werden könnten. Nur ein Beispiel: Um ein Kilowatt zu speichern, benötigt man bei Bleibatterien einen Platz von etwa 50 Litern. Bei einem Ringwallspeicher müsste man zur Speicherung der gleichen Menge Energie 4000 Liter Wasser zirka 100 Meter hochpumpen.

Antwort des Autors Matthias Popp:
Bei Ringwallspeichern handelt es sich nicht um Fantasiegebilde, sie verursachen auch keine Riesenkosten. Bleiakkumulatoren haben Kapazitäten von etwa einer Kilowattstunde und einen Preis von rund 100 Euro bei einer Lebensdauer von zirka fünf Jahren. Diese Akkus könnten durchaus Stromüberschüsse einer Fotovoltaikanlage vom Tag auf die Nacht übertragen. Das ist aber nicht die Herausforderung, um die es geht. Eine Industrienation benötigt auch dann eine zuverlässige Stromversorgung, wenn über längere Zeit kein Wind bläst, die Fotovoltaikanlagen zugeschneit sind oder Nebel herrscht.

Diese Situationen habe ich mit meinen Wetteruntersuchungen über einen fast 40-jährigen Zeitraum analysiert. Ergebnis ist, dass pro Kopf der Bevölkerung eine Speicherkapazität von 100 bis 250 Kilowattstunden benötigt wird, um auch die ungünstigen Wetterperioden sicher zu überbrücken.

Das wären dann pro Kopf der Bevölkerung 10 000 bis 25 000 Euro Kosten für Akkus, bei einer Lebensdauer von fünf Jahren also jährlich 2000 bis 5000 Euro. Im Vergleich dazu liegt die jährliche Stromrechnung eines Einfamilienhaushalts bei rund 700 Euro. Die Kosten für eine Kilowattstunde mit einem Ringwallspeicher können dagegen mit 10 bis 50 Euro veranschlagt werden, bei einer Lebensdauer von mehreren Jahrzehnten.

Bei Ringwallspeichern, die mit Wind- und Fotovoltaik kombiniert werden, ist, je nach Auslegung und konkreten Verhältnissen, eine Energieamortisationszeit von unter drei Jahren zu erwarten. Bei Batteriesystemen läge diese Zeit deutlich höher.

Einfluss des Mondes

Konstruktionsfehler des Auges gehen zurück auf die frühe Entstehung vor mehr als 500 Millionen Jahren, so der australische Sinnesphysiologe Trevor Lamb. (»Das Auge – Organ mit Vergangenheit«, Februar 2012, S. 22)

Franz-Stephan Beyer, Dresden: Im Artikel wird richtig erklärt, dass zunächst simple Lichtsensoren die frühen Tiere über Tag und Nacht und die Jahreszeiten informierten. Es sei allerdings daran erinnert, dass man schon immer das halbe Leben in der Nacht verbringt und dann der Mond mit seinen verschieden hellen Phasen leuchtet. Dieser Rhythmus informiert über die teilweise dramatischen Veränderungen der Gezeitenhübe an den Meeresküsten (Springtiden und Nipptiden), worauf die dort lebenden Tiere ihr Verhalten bis heute angepasst haben und sich dabei am Mondlicht orientieren. Also nicht immer nur an die Sonne denken, der Mond ist auch noch da.

Erratum
»Bakteriengemeinschaften im Darm«, Forschung aktuell, Januar 2012, S. 19
Auf S. 20 muss es statt 100 Trillionen Bakterienzellen 100 Billionen heißen. Wir bitten den Fehler zu entschuldigen.

FOLGEN SIE UNS IM INTERNET

facebook
www.spektrum.de/facebook

YouTube
www.spektrum.de/youtube

studiVZ
www.spektrum.de/studivz

twitter
www.spektrum.de/twitter

BRIEFE AN DIE REDAKTION

... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf www.spektrum.de/leserbriefe oder schreiben Sie mit Ihrer kompletten Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Leserbriefe
Sigrid Spies
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

Die vollständigen Leserbriefe und Antworten der Autoren finden Sie ebenfalls unter: www.spektrum.de/leserbriefe

GEOWISSENSCHAFTEN

Diamanten rasen zur Erdoberfläche empor

Diamant ist extrem hart – doch unter den Bedingungen, die in der tiefen Erdkruste herrschen, kann er sich binnen Stunden oder Tagen in Graphit umwandeln. Nur wenn das edle Mineral sehr rasch von seinem Entstehungsort im Erdmantel in höhere Lagen der Erdkruste aufsteigt, ist sichergestellt, dass es die Reise unbeschadet übersteht. Das gelingt den Diamanten, indem sie von emporrasenden Gesteinsschmelzen mitgerissen werden. Wie diese ihr hohes Tempo erreichen, haben Vulkanologen um James Russell von der University of British Columbia in Vancouver (Kanada) herausgefunden.

Tief aus dem Erdinnern kommend, steigt schweres, kohlenstoffreiches Magma auf. Im oberen Mantel kommt es mit kieselsäurereichen Mineralen in Kontakt, etwa mit Orthopyroxenen. Die Forscher testeten im Labor, was dabei passiert. Demnach lösen sich die Orthopyroxene im Magma, wodurch dessen Fähigkeit abnimmt, Kohlendioxid zu speichern. Infolgedessen tritt flüssiges Kohlendioxid aus der Schmelze aus, was ihre Dichte verringert und ihr einen starken Auftrieb verschafft. Die kimberlitische Schmelze steigt nun rasch nach oben und reißt dabei Material aus dem Mantel mit sich – darunter Diamanten.

Während des Aufstiegs löst sich immer neues kieselsäurereiches Material im Magma, was dafür sorgt, dass noch mehr Kohlendioxid austritt und der Auftrieb sich weiter verstärkt. Auf diese Weise kann das Material innerhalb von drei bis acht Stunden aus 120 Kilometer Tiefe bis fast zur Erdoberfläche vordringen, wo es erstarrt und die Diamanten sicher einschließt.

Nature 481, S. 352–356, 2012

FOTOLIA / APTTONE, SERGII POPOV

In der tiefen Erdkruste würden sich Diamanten rasch in Graphit umwandeln.

WAHRNEHMUNG

Springspinnen jagen nur bei Grünlicht gut

Die Spinne *Hasarius adansoni* ergreift ihre Opfer mit einem präzisen Sprung. Dazu muss sie die Distanz zur Beute genau einschätzen. Das gelingt ihr auch – allerdings nur bei grünem Licht.

Hasarius adansoni besitzt zwei Hauptaugen mit einer Netzhaut, die aus vier Schichten besteht. Die Lichtrezeptoren darin sprechen jeweils bevorzugt auf unterschiedliche Wellenlängen an. Auffällig ist, dass die zweitunterste Schicht Rezeptoren enthält, die für grünes Licht empfindlich sind, obwohl die Augenlinse solches Licht überhaupt nicht dorthin fokussiert. Mit dieser Netzhautschicht nehmen die Spinnen also nur unscharfe Bilder wahr.

Genau das hilft ihnen aber beim Schätzen von Entfernungen, wie Forscher um Mitsumasa Koyanagi von der Osaka City University (Japan) jetzt gezeigt haben. Offenbar vergleicht die Spinne das verschwommene Bild der zweituntersten Netzhautschicht mit dem scharfen Bild der untersten Netzhautschicht, auf die korrekt fokussiert wird. Aus dem Ausmaß der Unschärfe ermittelt sie den hierzu umgekehrt proportionalen Abstand des Beutetiers.

Ein Experiment, bei dem die Spinnen unter verschiedenen Lichtverhältnissen jagten, bestätigte diese Hypothese. Unter natürlicher sowie monochromatisch grüner Beleuchtung gelang den Tieren stets ein präziser Sprung. Bei Rotlicht hingegen zielten sie immer zu kurz. Der Grund hierfür ist, dass ihre Augenlinse rote Strahlen weniger stark bricht als grüne. Daraus resultiert eine größere Unschärfe auf der zweituntersten Netzhautschicht, weshalb die Spinne den Abstand zum Beutetier unterschätzt. Unter natürlichen Bedingungen tritt dieser Fehler nicht auf, da grüne Wellenlängen im Sonnenlicht reichlich vorkommen und von den für Grün empfindlichen Rezeptoren auch am effektivsten absorbiert werden.

Science 335, S. 469–471, 2012

NAGATA, T. ET AL. / SCIENCE / AAAS

Die Springspinne *Hasarius adansoni* besitzt vier vorwärtsgerichtete Augen: zwei Hauptaugen (Pfeile) und zwei vordere Seitenaugen. Um die Entfernung zum Beutetier einzuschätzen, benötigt sie lediglich die ersteren.

BIOLOGIE

Schutzpanzer gegen Piranhas

Arapaimas gigas ist einer der größten Süßwasserfische der Erde. Er lebt im Amazonasbecken, wird zweieinhalb Meter lang und 200 Kilogramm schwer. Obwohl er häufig mit hungrigen Piranhas zusammentrifft, fällt er ihnen selten zum Opfer. Marc Meyers von der University of California in San Diego und seine Kollegen haben nun herausgefunden, warum: Seine bis zu zehn Zentimeter langen Schuppen trotzen den messerscharfen Zähnen der Räuber. Meyers und sein Team befestigten Piranha-Zähne in einer Art Beißautomat und versuchten damit, *Arapaimas*-Schuppen zu durchstoßen. Diese erwiesen sich in den Versuchen jedoch als beinahe undurchdringlich; mehrmals zerbrachen sogar die Zähne der Raubfische an ihnen. Mikroskopuntersuchungen zeigten, dass die Schuppen zwei Lagen aufweisen: Die innere besteht aus mehreren Schichten elastischer Kollagenfasern, die kreuzweise übereinanderliegen, die äußere aus einer steinharten Faserschicht, die viel Kalzium enthält. Dieses biologische Kompositmaterial besitzt eine geriffelte Oberfläche, wodurch es trotz seiner spröden Außenschicht biegsam bleibt.

Advanced Engineering Materials 14, B1–B10, 2012

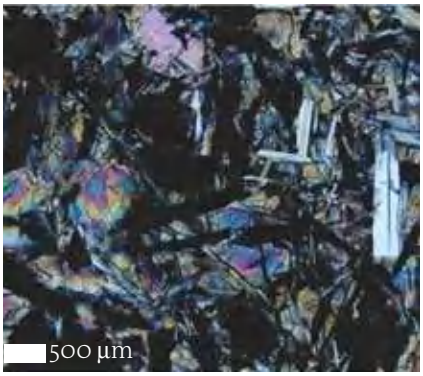
UCSD JACOBS SCHOOL OF ENGINEERING

Enorm widerstandsfähige Schuppen bewahren den Fisch *Arapaimas gigas* davor, von Piranhas zerfleischt zu werden. Die hell gefärbten Bereiche waren von darüberliegenden Schuppen bedeckt.

ASTRONOMIE

Mondmagnetfeld ging erst spät verloren

Im Unterschied zur Erde hat der Mond heute kein Magnetfeld. Vor langer Zeit war das anders: Der junge Trabant besaß noch einen flüssigen Kern aus geschmolzenem Eisen und Nickel, der über Konvektionsströme ein magnetisches Feld ähnlich dem irdischen erzeugte. Bislang waren Forscher davon ausgegangen, dass der Mondkern vor rund 4,2 Milliarden Jahren erstarrte, wodurch das lunare Feld zusammenbrach. Nun hat ein Team um Erin Shea vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge (USA) Belege dafür gefunden, dass unser Trabant noch vor 3,7 Milliarden Jahren ein eigenes Magnetfeld aufwies.



SHEA, E. K. ET AL./ SCIENCE/AAAS

Der Mondbrocken 10020 unter dem Mikroskop. Seine Magnetisierung erlaubt Rückschlüsse auf das frühere Magnetfeld unseres Trabanten.

Das Team untersuchte einen Basaltbrocken, den Apollo-11-Astronauten 1969 aufgesammelt hatten. Er gelangte als Lava an die Mondoberfläche und erstarrte dort. Das geschah vor 3,7 Milliarden Jahren, wie die Forscher jetzt ermittelten, also rund 800 Millionen Jahre nach der Entstehung der Erde und ihres Begleiters. Der Stein enthält die Eisenverbindung Kamazit, die beim Erstarren magnetisiert wurde. Da sich Störeffekte wie die Stoßwelle eines Meteoriteneinschlags ausschließen lassen, kommt als Ursache für die Magnetisierung nur ein lunares Magnetfeld in Frage – das demzufolge fast dreimal so lange existierte wie bisher angenommen. Die damalige Flussdichte des Felds bestimmten die Forscher anhand der Eigenschaften des Brockens auf rund zwölf Mikrotesla; das ist ein Viertel des heutigen Erdmagnetfelds in unseren Breiten.

Science 335, S. 453–456, 2012

MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de

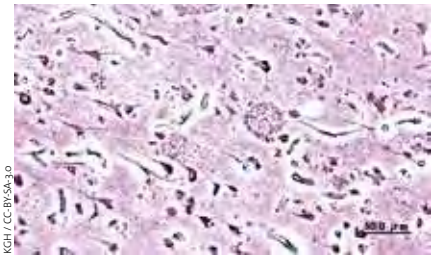
Aktuelle Spektrogramme
finden Sie täglich unter
www.spektrum.de/spektrogramm

MEDIZIN

Krebsmedikament hilft gegen Alzheimer

Der Wirkstoff Bexaroten bewährt sich seit Jahren in der Krebstherapie. Offenbar hat er aber noch mehr Potenzial: Zumindest Mäuse kuriert er von den charakteristischen Anzeichen der Alzheimerkrankheit.

Im Gehirn von Alzheimerpatienten verklumpt der natürlich vorkommende Eiweißstoff Beta-Amyloid und bildet unlösliche Ablagerungen, so genannte Plaques. Forscher machen diese verantwortlich für den fortschreitenden geistigen Verfall der Betroffenen. Genetisch veränderte Mäuse, die Beta-Amyloid nicht abbauen können, zeigen alzheimerähnliche Symptome: Sie folgen etwa nicht mehr ihrem Instinkt, Nester zu bauen, selbst wenn das Material dafür bereitsteht.



KGH / CC-BY-SA-3.0

Mikroskopaufnahme von Eiweißablagerungen (Plaques) in der Großhirnrinde eines Alzheimerpatienten

Als Forscher um Gary Landreth von der Case Western Reserve University in Cleveland (USA) solchen Tieren jedoch Bexaroten verabreichten, verhielten sich die Nager bereits nach wenigen Tagen wieder normal. In ihren Gehirnen war drei Tage nach Beginn der Behandlung fast die Hälfte der Plaques verschwunden; zwei Wochen nach Behandlungsbeginn waren es sogar drei Viertel. Selbst bei älteren Mäusen, die unter fortgeschrittener Demenz litten, führte die siebentägige Gabe von Bexaroten zu einem Rückgang der Plaques um 50 Prozent.

Bexaroten regt die Produktion des Apolipoproteins E (ApoE) an, von dem bekannt ist, dass es Beta-Amyloid abbauen hilft. Im nächsten Schritt wollen die Forscher nun an menschlichen Alzheimerpatienten untersuchen, ob das Medikament hier ebenfalls den Krankheitssymptomen entgegenwirkt.

Science 10.1126/science.1217697

MATERIALFORSCHUNG

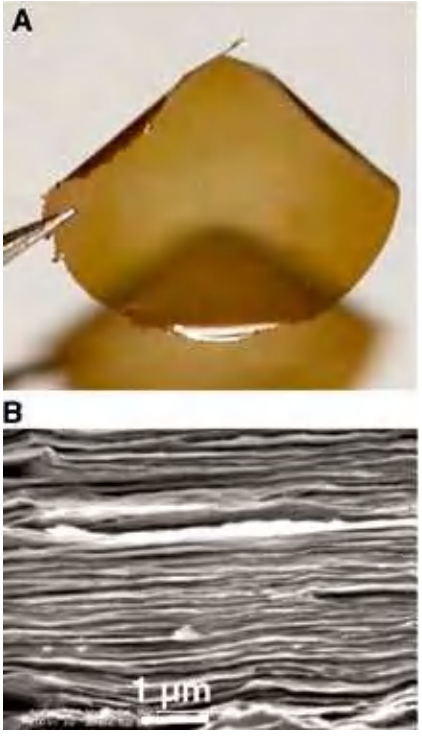
Nur Wasser kommt durch

Eine Spezialfolie aus Graphenoxid hält verschiedenste Gase und Flüssigkeiten zurück, lässt Wasser aber ungehindert passieren. Das hat ein Team um den Physik-Nobelpreisträger Andre Geim von der University of Manchester gezeigt. Die Forscher konstruierten mikrometerdünne Membranen aus vielen aufeinandergeschichteten, überlappenden Graphenoxidblättern. Damit verschlossen sie spezielle Behälter, in die sie verschiedene Gase und Flüssigkeiten einfüllten. Anschließend beobachteten sie, wie schnell die Substanzen aus den Gefäßen entwichen.

Zur Überraschung der Wissenschaftler ließen die Membranen fast keinen der Stoffe durch. Weder Helium, Wasserstoff, Stickstoff oder Argon noch Ethanol, Hexan, Aceton oder Propanol gelangten während der mehrtägigen Versuche in messbarer Menge aus den Behältern. Wasser dagegen verdunstete praktisch ungehindert, als wäre die Abdeckfolie nicht da. Die Forscher vermuten, dass die Membranen von winzigen Kanälen durchzogen sind, durch die sich nur Wassermoleküle bewegen können. Denn zwischen den einzelnen Graphenoxidblättern gibt es stellenweise Leerräume, die einige Zehntel Nanometer breit sind. Diese Leerräume verbinden sich zu einem Netzwerk aus Poren.

In wasserfreier Umgebung verengen sich die Kanäle, was die Membran undurchlässig macht. Eindringende H_2O-Moleküle dagegen erweitern die Poren etwas, so dass eine monomolekulare Wasserschicht darin Platz hat. Enorme Kapillarkräfte saugen diese Wasserschicht dann rasch durch die feinen Kanäle. Das Material könnte sich zum Beispiel dafür eignen, Wasser hochselektiv aus Stoffgemischen zu entfernen.

Science 335, S. 442–444, 2012



NAIR, R. R. ET AL. / SCIENCE / AAAS

Die mikrometerdünnen Spezialfolien (A) lassen nur Wasser durch. Elektronenmikroskopische Untersuchungen zeigen, dass sie aus vielen aufeinandergeschichteten Graphenoxidlagen bestehen (B).

WINZLING MIT SCHUPPEN

15 Millimeter von der Schnauze bis zur Schwanzspitze: Dieses Jungtier von *Brookesia micra* zählt zu den kleinsten Reptilien der Welt. Die Eltern erreichen keine drei Zentimeter Länge. Frank Glaw von der Zoologischen Staatssammlung München und seine Kollegen entdeckten die neue Chamäleonart und drei weitere winzige Verwandte im äußersten Norden Madagaskars sowie auf der vorgelagerten Insel Nosy Hara in vorwiegend bewaldeten, felsigen Gebieten. Klare Worte wählten die Forscher mit den weiteren Artnamen *B. desperata* und *B. tristis*: Ihr Lebensraum, obwohl Schutzgebiet, wird immer mehr zerstört.

PLoS ONE 7(2): e31314, 2012

JÖRN KÖHLER, HESSISCHES LANDESMUSEUM DARMSTADT

ASTROPHYSIK

Supernova aus zwei Zwergen

Bei der Rekonstruktion einer Supernova erlebten Astronomen eine Überraschung. Der gewaltigen Sternexplosion vor 400 Jahren ging die Verschmelzung zweier Weißer Zwerge voraus.

VON JAN HATTENBACH

Ende der 1990er Jahre stellten zwei Forscherteams Erstaunliches fest: Galaxien driften im Lauf der Zeit immer schneller voneinander fort – die Expansion des Kosmos beschleunigt sich also. Diese Entdeckung, heute einer der Gravitation entgegenwirkenden »Dunklen Energie« zugeschrieben, verhalf den Amerikanern Saul Perlmutter, Adam Riess und Brian Schmidt 2011 zum Nobelpreis für Physik (siehe SdW 12/2011, S. 12). Doch wie sicher können sie sich ihrer Erkenntnis sein? Die Distanzen der Galaxien von der Erde maßen die Forscher mit Hilfe von Supernovae des Typs Ia – Sternexplosionen, die so hell sind, dass man sie noch am Rand des sichtbaren Universums sehen kann. Sie gelten als gute Entfernungsmarken – aber sind sie es auch?

Verwendet man geeignete Korrekturfaktoren, verhalten sich solche Supernovae wie »Standardkerzen« immer gleicher Helligkeit. Vergleichbar mit im Raum verteilten Glühbirnen bekannter Wattzahl sollten sie umso schwächer erscheinen, je weiter sie entfernt sind. Diese bemerkenswerte Eigenschaft erklären die Astronomen dadurch, dass bei solchen Ereignissen jeweils sehr ähnliche Objekte explodieren. Unter Generalverdacht standen schnell die Weißen Zwerge: Sternleichen, die durch Kernfusion keine Energie mehr gewinnen können. Sie sind etwa so groß wie die Erde, können aber mehr Material als die Sonne enthalten. Stabil sind sie jedoch nur bis zu etwa 1,4 Sonnenmassen. Wird dieser Wert überschritten, beginnen die Atomkerne in ihrem Inneren plötzlich und unkontrolliert zu verschmelzen, und die Zwerge explodieren als Supernovae.

Im August 2011 leuchtete in der 21 Millionen Lichtjahre entfernten Spiralgalaxie M 101 ein Stern hell auf. Bei dieser Explosion handelte es sich um SN 2011fe, die nächstgelegene Supernova des Typs Ia seit vielen Jahren. Das Bild entstand am 18. September, etwa zwei Wochen nach Erreichen der Maximalhelligkeit. Zu diesem Zeitpunkt war die Supernova bereits mit einem Fernglas zu sehen.

NOAO / AURA / NSF, HEIDI SCHWEIKER & SABRINA PAKZAD / UAA, TRAVIS RECTOR

Ein astronomischer Glücksfall

Doch streng genommen war dies bis vor Kurzem nur eine Hypothese. Immerhin hatten die Astronomen in den Spektren der Supernovae die Hauptbestandteile Weißer Zwerge gefunden: große Mengen Kohlenstoff und Sauerstoff. Wasserstoff und Helium, aus denen »normale« Sterne hauptsächlich bestehen, kamen hingegen nur in geringen Mengen vor. Auch Archivbilder lieferten Hinweise: Oft fanden die Forscher auf ihnen keine Objekte, die als Kandidat für eine Explosion in Frage kamen. Die Supernova-Vorläufer müssen also sehr klein gewesen sein.

Ein überzeugender Nachweis fehlte aber noch. Es war daher ein Glücksfall, als im August 2011 in der Galaxie M 101 eine geeignete Typ-Ia-Supernova aufleuchtete, die nächstgelegene seit Jahrzehnten (Bild links). Nun hatte man einen Tatort praktisch um die Ecke, den man mit einem ganzen Arsenal modernster Teleskope untersuchen konnte. Schon elf Stunden nach der eigentlichen Explosion hatten verschiedene Teleskope M 101 in den Blick genommen. So konnten die Forscher die auf den Namen SN 2011fe getaufte Supernova fast von Beginn an verfolgen.

Ein kleines, ferngesteuertes Teleskop auf Mallorca lichtete die Galaxie zufällig sogar acht Stunden vorher ab. Zu sehen war allerdings – nichts! Für Joshua

RÖNTGEN: NASA / CXC / SAO / RUTGERS, JACK HUGHES ET AL.; OPTISCH: NASA / ESA, STSCI

Die Explosionswolke um SNR 0509-67.5 expandiert mit einer Geschwindigkeit von 5000 Kilometer pro Sekunde. Seitdem das ursprüngliche Objekt vor 400 Jahren explodierte, ist sie auf einen Durchmesser von 23 Lichtjahren angewachsen. Das Bild kombiniert Daten zweier Weltraumteleskope. Während Hubble das Wasserstoffgas registriert (rot), ist Chandra für die Röntgenstrahlung empfindlich, die das heiße Gas der Explosionswolke aussendet (grün und blau). Im Zentrum des Rings, wo die Supernova einst aufleuchtete, fanden Astronomen keine fliehenden Sterne – daraus schließen sie, dass hier zwei Weiße Zwerge miteinander verschmolzen sind.

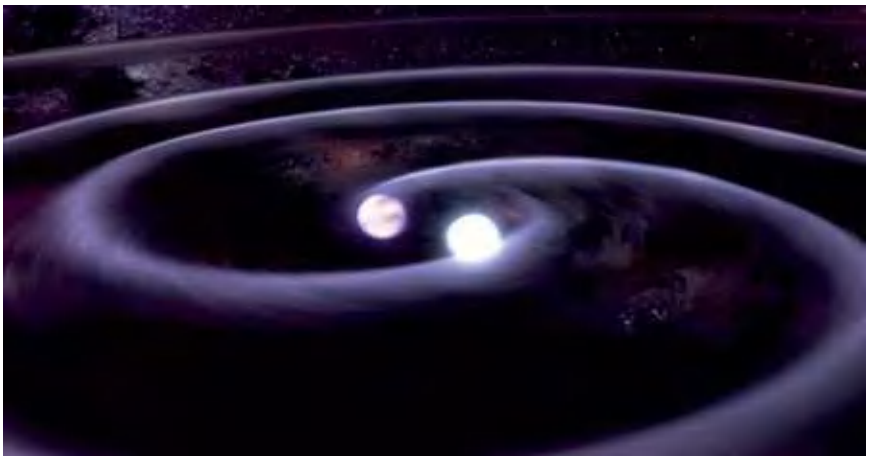
Bloom von der University of California in Berkeley und seine Kollegen ist genau das der lange gesuchte Beleg, dass hier ein Weißer Zwerg explodiert ist *(Nature, 480, S. 348–350, 15. Dezember 2011)*. Ein größerer Stern hätte nämlich einen Lichtblitz erzeugt, der zu diesem Zeitpunkt vom Teleskop registriert worden wäre. Um letzte Zweifel auszuräumen, nahmen die Forscher auch theoretische Modelle explodierender Sterne zu Hilfe. »Es ist das erste Mal, dass wir sicher sagen können, was da genau explodiert ist«, sagt Blooms Kollege Ken Shen.

Flüchtende Helfersterne

Damit scheinen die Weißen Zwerge zwar überführt. Doch ihr kriminalistischer Spürsinn ließ die Forscher nicht ruhen. Denn eine weitere, scheinbar simple Frage war offen geblieben. Wie erreicht ein Weißer Zwerg seine kritische Masse? Klar ist: Ein einzelnes solches Objekt macht noch keine Supernova – die meisten Zwerge liegen deutlich unter der so genannten Chandrasekhar-Grenze von 1,4 Sonnenmassen. Ohne einen den Zwerg in enger Umlaufbahn umkreisenden »Materiespender« kann es also nicht zur Explosion kommen. Der Mittäter könnte ein normaler, sonnenähnlicher Stern sein, der Wasserstoff zu Helium verbrennt, ein gealterter Stern, der bereits Helium zu schwereren Elementen verarbeitet oder auch ein Roter Riese, also ein sterbender Stern in seinen letzten Lebensphasen. Selbst ein zweiter Weißer Zwerg ist denkbar. Wegen der vermuteten Seltenheit entsprechender Doppelsysteme rechneten die Forscher damit aber bislang eher nicht.

In fast allen Fällen würde Materie vom Begleitstern langsam in Richtung des Zwergs strömen, sich in einer so genannten Akkretionsscheibe um ihn sammeln und langsam seine Masse vergrößern. Bei Erreichen der Chandrasekhar-Grenze explodiert der Zwerg dann. Die immer gleichen Umstände, insbesondere die exakt gleiche Explosionsmasse, machen dieses Akkretionsmodell zur besten Erklärung für Supernovae des Typs Ia. Der Spenderstern würde die Explosion sogar überleben, sich durch den Druck der Explosion jedoch schnell vom Ort des Geschehens entfernen.

Was aber, wenn kein rasch fliehender Helferstern zu finden ist? Dann kommt nur noch ein einziges Szenario in Frage: Falls das System aus zwei Weißen Zwergen bestünde, würden beide Beteiligten zu einem einzigen Objekt verschmel-



NASA, GSFC, TOD STROHMAYER / CHANDRA X-RAY OBSERVATORY / DANA BERRY

Das Vorläufersystem einer Typ-Ia-Supernova besteht aus einem Weißen Zwerg und einem Begleiter, der Material an den Zwerg »spendet«. Der Spender kann unter anderem ein Roter Riese sein, aber auch ein weiterer Weißer Zwerg. Diese letztere Variante (links) hielten die Astronomen indessen für unwahrscheinlich: Systeme aus zwei Weißen Zwergen seien zu selten. Nun aber untersuchten sie den Supernova-Überrest SNR 0509-67.5 und konnten nachweisen, dass er tatsächlich das Resultat zweier solcher Objekte ist, die miteinander verschmolzen sind.

zen und bei der anschließenden Explosion vollständig vernichtet.

Die Suche nach sich rasch bewegenden Helfersternen ist schwierig, selbst M 101 ist dafür zu weit entfernt. Sicher sind sich die Forscher nur darin, dass es kein Roter Riese war, der die Lunte an den Vorläufer von SN 2011fe gelegt hat; es bleiben also noch die Möglichkeiten sonnenähnlicher Stern und Weißer Zwerg. Sie brauchen also einen weiteren Testfall: eine Supernova in noch geringerer Entfernung.

Alle Kandidaten scheiden aus – bis auf einen

Doch diese sind rar. In den vergangenen Jahrzehnten ereignete sich keine einzige Typ-Ia-Supernova in der Nähe der Milchstraße. Die sogar mit dem unbewaffneten Auge sichtbare Supernova von 1987 in der Großen Magellanschen Wolke war vom Typ II, hier explodierte ein massiver Stern, 17-mal so schwer wie die Sonne. 2004 immerhin fanden Astronomen andernorts einen möglichen Kandidaten für einen Helferstern. Das sonnenähnliche Exemplar könnte seinerzeit die Supernova des Jahres 1572 ausgelöst haben, die unter anderem der berühmte Astronom Tycho Brahe beobachtete. Andererseits könnte er auch nur zufällig in der Nähe der Explosion gewesen sein.

Jetzt gelang der Durchbruch. Erstmals scheint es Astronomen gelungen zu sein, alle Explosionsszenarien bis auf eines ausschließen zu können. Der Ort des Geschehens: wiederum die Große Magellansche Wolke, 160 000 Lichtjahre entfernt, im Vergleich zu M 101 gerade vor der Haustür. Vor 400 Jahren zerriss es hier einen Weißen Zwerg, und dank Hubble und anderer Teleskope können Forscher die damalige Explosionszone heute im Detail studieren. Einen Stern in der Nähe des Zentrums der schalenförmigen Explosionswolke, die als SNR 0509-67.5 bezeichnet wird, konnten Bradley Schaefer und Ashley Pagnotta von der Louisiana State University aber auch nach intensiver Suche nicht finden (siehe Bild auf S. 13). Selbst wenn ein hypothetischer Begleiter durch den Explosionsschock mit hoher Geschwindigkeit fortgestoßen worden wäre, hätte er in 400 Jahren nicht weit genug kommen können, um sich den Blicken der Astronomen zu entziehen. Als Mittäter scheiden hier also ein Roter Riese ebenso wie ein sonnengroßer Stern aus.

Als einzige Erklärung bleibt daher das Szenario zweier verschmelzender Weißer Zwerge übrig. »Unsere Analyse folgt der Logik von Sherlock Holmes«, meinte Pagnotta im Januar auf der Jahrestagung der Amerikanischen Astronomischen Gesellschaft. »Wir haben alle unmöglichen Szenarien ausgeschlossen, was übrig bleibt, so unwahrscheinlich es auch sein mag, muss die Wahrheit sein!«

Zum ersten Mal wurde damit das Vorläufersystem einer Typ-Ia-Supernova identifiziert – und ausgerechnet das beliebte Akkretionsmodell scheidet aus. Ein Einzelfall? Pagnotta und Schaefer wollen bei sechs weiteren Explosionen nach möglichen Helfersternen fahnden, können dies mit ihrer Methode aber nur in der unmittelbaren Umgebung der Milchstraße tun, denn in fernen Galaxien lassen sich einzelne Sterne kaum ausmachen.

Ein anderes Verfahren verwendeten Akos Bogdan und Marat Gilfanov vom Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching. Ihre Überlegung: Bei der Akkretion von Materie auf den Weißen Zwerg sollte reichlich Röntgenstrahlung entstehen, nicht aber bei der Kollision zweier Zwerge. Gilfanov und Bogdan durchsuchten daher die von fernen Galaxien insgesamt abgegebene Röntgenstrahlung und verglichen diese mit der statistischen Anzahl von Typ-Ia-Supernovae in diesen Galaxien (*Nature 463, S. 924–925, 18. Februar 2010*). Ihr Resultat: Der Gesamtfluss der Röntgenstrahlung ist zu gering, als dass er alle Supernova-Explosionen in einer Galaxie erklären könnte. Nur wenige Prozent aller Supernovae vom Typ Ia wären demzufolge auf das Akkretionsmodell zurückzuführen. Andere Forschergruppen bezweifeln dieses Ergebnis zwar, doch Gilfanov sieht es durch Pagnottas und Schaefers Resultat gestützt.

Andererseits stießen Forscher auch auf Indizien, die für das Akkretionsmodell sprechen. So berichteten Rasmus Voss vom Max-Planck Institut für Extraterrestrische Physik in Garching und Gijs Nelemans von der Radbout-Universität in Nimwegen 2008 über Röntgenstrahlung, die tatsächlich aus der

Richtung einer späteren Supernova zu kommen schien.

Noch bleibt viel zu tun, doch allmählich zeichnet sich ein Bild ab: Zumindest einige, vielleicht sogar die meisten Supernovae vom Typ Ia entstehen bei der Kollision zweier Weißer Zwerge. Die Grundidee, dass alle diese Objekte genau dann explodieren, wenn sie 1,4 Sonnenmassen erreicht haben, lässt sich also kaum aufrechterhalten. Wenn sie verschmelzen, können sie schließlich ganz unterschiedliche Massen besitzen.

Steht damit die Eigenschaft der Supernovae als Standardkerzen in Frage, die unter anderem zur Entdeckung der Dunklen Energie geführt hat? Allzu beunruhigt muss man wohl nicht sein. Eine Forschergruppe um Rüdiger Pakmor vom Heidelberger Institut für Theoretische Studien berichtete im Januar, am Computer eine solche Zwergenkollision simuliert zu haben *(arXiv:1201.5123v1 [astro-ph.HE], 24. Januar 2012)*. Die resultierende Explosion besaß dabei recht genau die Eigenschaften, die man bei den meisten Supernovae vom Typ Ia beobachtet. Die Dunkle Energie steht also nicht zur Disposition. Im Gegenteil: Wenn die Astrophysiker ihre Standardkerzen erst einmal richtig verstanden haben, werden sie die Expansion des Universums noch weit genauer vermessen können als bisher – und so sogar herausfinden, ob der Einfluss der Dunklen Energie konstant ist oder sich im Lauf der Zeit verändert.

Jan Hattenbach ist Physiker und freier Wissenschaftsjournalist in Aachen. Er bloggt auf www.scilogs.de/himmelslichter.

BIOPHYSIK

Springende Eidechsen, Dinosaurier und Roboter

Agamen-Eidechsen steuern beim Springen mit ihrem Schwanz – genauso wie früher einige Dinosaurier!

VON R. MCNEILL ALEXANDER

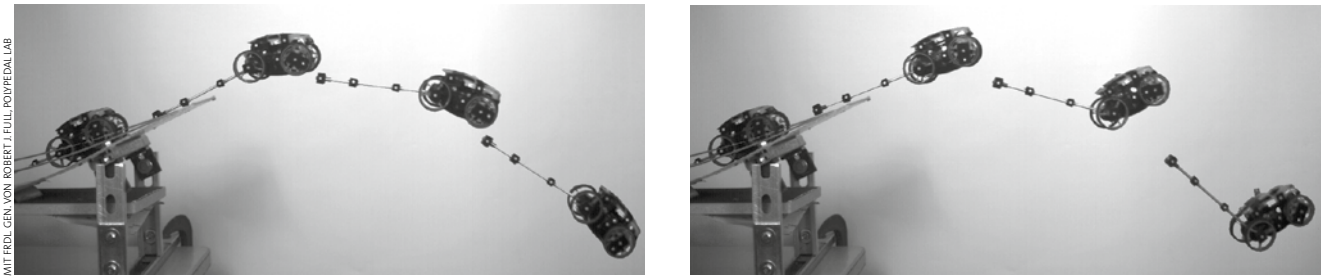
MIT FRDL. GEN. VON ROBERT J. FULL, POLYPEDAL LAB

Diese Sequenzen zeigen die Eidechse beim Sprung über einen Zeitraum von 0,6 Sekunden. Links springt das Tier von einer griffigen, rechts von einer glatten Platform ab. Man sieht, wie es den Schwanz einsetzt, um den Kopf für die Landung oben zu halten.

Eidechsen der Agamen-Familie können ziemlich gut springen und noch besser landen. Forscher um den Biologen Robert J. Full von der University of California in Berkeley filmten diese Schuppenkriechtiere, wie sie von einer waagrechten Plattform an eine senkrechte Wand hüpften. Dabei steuerten sie ihre Flugbewegung mit dem Schwanz so, dass sie für die akrobatische Landung ihren Körper immer in die richtige Haltung brachten (*Nature 481, S. 181–184, 2012*).

Jede Bewegung unterliegt dem Prinzip von der Erhaltung des Drehimpulses. Dieses besagt, dass der Drehimpuls eines Systems gleich bleibt, solange keine äußeren Kräfte darauf einwirken. So kann ein Seiltänzer sein Gleichgewicht bewahren, indem er zum Ausgleich von Lageänderungen seines Körpers die Balancierstange in die entgegengesetzte Richtung neigt. Mit kleinen Ausgleichsbewegungen kann er also seinen Schwerpunkt dort behalten, wo er hingehört: genau über dem Seil. Lange, dünne Stangen funktionieren besser als kurze, dicke. Denn bei gleichem Gewicht überwiegt bei ersteren das Trägheitsmoment. Der Drehimpuls eines Körpers ist gleich seiner Winkelgeschwindigkeit multipliziert mit seinem Trägheitsmoment. Diese simple Regel setzt nur voraus, dass seitliche Bewegungen so klein sind, dass das Trägheitsmoment des Tänzers um das Seil herum vernachlässigt werden kann.

Die kalifornischen Forscher fanden heraus: Drehte die Eidechse für eine sichere Landung an der glatten Wand beim Sprung Kopf und Körper nach oben, bog sie gleichzeitig auch ihren Schwanz nach oben (Zeitlupenaufnahmen verschiedener Sprünge finden Sie hier: www.physorg.com/news/2012-01-lizards-dinosaurs-message-robots-tail.html). Dadurch drehte sich der Schwanz



MIT FRDL. GEN. VON ROBERT J. FULL, POLYPEDAL LAB

Spielzeugroboter im Hechtsprung: Dieses kleine Vehikel hat einen beweglichen Schwanz, den es über eine Elektronik aktiv steuern kann. Bei passivem Schwanz (links) neigt es sich nach unten, während es bei aktiver Steuerung seine Lage beibehält.

im Uhrzeigersinn und der Körper in entgegengesetzter Richtung, so dass der Gesamtdrehimpuls erhalten blieb.

Dann wollten die Biologen klären, ob die Eidechse mit dem Schwanz auch Bewegungsfehler beim Absprung nachkorrigieren kann. Dafür legten sie bei einigen Sprüngen eine glatte Folie auf die Plattform. Rutschte dem Tier beim Absprung ein Fuß weg, verkippte zwar sein Körper, es korrigierte aber sofort die Schieflage durch eine passende Schwanzdrehung .

Full und sein Team entwickelten ein mathematisches Modell, um ihre Beobachtungen quantitativ nachzuvollziehen. Zu dessen Überprüfung bauten die Forscher ein Spielzeug: einen kleinen Roboter mit vier Rädern und einem Schwanz (Bilder oben). Wie ein Schispringer hechtet das Vehikel von einer Schanze. Dabei kippt es mit der Nase schon nach unten, während die Hinterräder noch auf dem Sprungbrett rollen. Bis zur Landung korrigiert das Gerät jedoch seine Schieflage mit seinem Schwanz nach, dessen Orientierung mit Hilfe eines Gyroskops an Bord gesteuert wird. Der Roboter kompensiert also seine schlechte Absprunghaltung sogar besser als die Eidechsen, wie auch im Video zu sehen.

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de

Die hier genannten Experimente als Video auf

www.spektrum.de/eidechse

Bei jeder guten Forschungsarbeit werfen die Resultate neue Fragen auf. So betrachteten Wissenschaftler in ihrer Studie nur die Schwanzbewegung in der vertikalen Ebene, in der die Hauptbewegung der Eidechse – das Nicken – verläuft. Kann der Schwanz auch dazu dienen, die Seitenbewegung, das »Gieren«, sowie das Rollen, nämlich die Drehung um die Bewegungsrichtung, auszugleichen? Beim Sprung an die steile Wand dominiert das Nicken. Aber Sprünge in komplexem Gelände über Felsen oder Äste erfordern Anpassungen in drei Dimensionen. In einer vorherigen Publikation hatten die Kalifornier bereits die Selbstkorrekturbewegungen fallender Geckos untersucht, doch jetzt können sie das Phänomen mit der Computersimulation noch genauer studieren.

Pferde springen am höchsten

Eine Reihe anderer Tiere nutzt ebenfalls das Trägheitsmoment ihres oft körperlangen Schwanzes zur Bewegungssteuerung, etwa Lemuren, Känguruhratten oder Katzen. Nach Ansicht der Biologen könnten auch einige Dinosaurierarten Sprünge in ihrem Bewegungsrepertoire gehabt haben, um damit wie die Agamen ihre Körperhaltung zu steuern. Falls das zutrifft, waren es wohl aber höchstens kleinere Dinos. Sehr große Tiere können einfach nicht weit springen. Denn bei ähnlicher Körpergeometrie wie bei den kleineren Verwandten steigt das Körpergewicht mit der dritten Potenz der Körperlänge, während die Stärke ihrer Muskeln und Knochen nur proportional zum Querschnitt wächst, also etwa mit dem Quadrat der Körperlänge.

Pferde und Elandantilopen zählen mit je rund einer halbe Tonne Lebendgewicht zu den größten Tieren, die noch springen können. Berechnungen auf Basis von Dinosaurierknochen und geschätzter Muskelmasse lassen vermuten, dass die größeren Urzeitechsen nicht besonders beweglich waren.

Gibt es Hinweise darauf, dass zumindest kleine Dinosaurier Sprünge absolviert haben? Die Fleisch fressende Gattung *Deinonychus* könnte mit ihren mutmaßlichen 70 Kilogramm die Größe eines Leoparden gehabt haben – und war damit fürs Springen eigentlich wie geschaffen. Einige Fossilienfunde legen sogar nahe, dass *Deinonychus* sogar in Gruppen gejagt und so weitaus größere Dinos erlegt haben könnte. Das ist zwar umstritten, doch gilt als sicher, dass *Deinonychus* auf Rücken und Flanken ihrer Opfer sprang, um sich dort mit seinen riesigen Krallen festzuhalten. Heute nutzen Löwen und andere große Raubkatzen ihre scharfen Krallen, um ihre Opfer zu greifen und ihnen dann mit ihren Zähnen an die Gurgel zu gehen.

Im Internet existieren diverse Zeichnungen von *Deinonychus* mitten im Sprung auf ein Opfertier. Das mag im Einzelfall etwas übertrieben sein, aber bei einigen ist sehr schön zu sehen, wie sich dabei ihr Schwanz nach oben biegt – ganz ähnlich, wie es Hull und sein Team bei den Agamen-Eidechsen beobachtet haben.

R. McNeill Alexander arbeitet am Institute of Integrative and Comparative Biology an der University of Leeds.

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 481, S. 181–184, 15. September 2011

Georg von Holtzbrinck
Preis für Wissenschaftsjournalismus

AUSSCHREIBUNG 2012

Der Preis wurde anlässlich des 150jährigen Jubiläums von Scientific American, einer der ältesten Wissenschaftszeitschriften der Welt, von der Verlagsgruppe Georg von Holtzbrinck 1995 ins Leben gerufen. Die Auswahl der Preisträger erfolgt jährlich durch eine Jury. Deren aktuelle Mitglieder sind:

Dr. Stefan von Holtzbrinck (Vorsitz)
Vorsitzender der Geschäftsführung,
Verlagsgruppe Georg von Holtzbrinck GmbH

Prof. Dr. Dr. Andreas Barner
Sprecher der Unternehmensleitung,
Boehringer Ingelheim GmbH

Ulrich Blumenthal
Redaktionsleiter „Forschung aktuell“,
Deutschlandfunk

Prof. Dr. Angela Friederici
Direktorin, Max-Planck-Institut für
Kognitions- und Neurowissenschaften

Prof. Dr. Peter Gruss
Präsident, Max-Planck-Gesellschaft zur
Förderung der Wissenschaften e.V.

Prof. Dr. Matthias Kleiner
Präsident, Deutsche Forschungsgemeinschaft e.V.

Dr. Carsten Könneker
Chefredakteur, Spektrum der Wissenschaft

Joachim Müller-Jung
Leiter des Ressorts Natur und Wissenschaft,
Frankfurter Allgemeine Zeitung

Andreas Sentker
Ressortleiter Wissen, DIE ZEIT

Ranga Yogeshwar
Moderator der ARD-Sendungen „Quarks & Co.“,
„Wissen vor acht“ u. a.

Teilnahmeberechtigt sind alle deutschsprachigen oder in deutschsprachigen Medien veröffentlichenden Journalistinnen und Journalisten. Die eingereichten Arbeiten sollen allgemeinverständlich sein und zur Popularisierung wissenschaftlicher Sachverhalte beitragen. Entscheidend ist die originelle journalistische Bearbeitung aktueller wissenschaftlicher Themen.

Es wird jeweils ein Preis in der Kategorie Print und ein Preis in der Kategorie elektronische Medien vergeben. **Jeder Preis ist mit 5.000 EUR dotiert.** Erstmals wird ein Nachwuchspreis für Bewerber, die Jahrgang 1983 und jünger sind, ausgelobt. **Der Nachwuchspreis ist mit 2.500 EUR dotiert.**

Die detaillierten Teilnahmebedingungen erhalten Sie unter **www.vf-holtzbrinck.de**.

Bewerben Sie sich mit drei Arbeitsproben und einem Kurzlebenslauf bis zum 1. April 2012.

KONTAKT

Veranstaltungsforum
der Verlagsgruppe
Georg von Holtzbrinck GmbH

Taubenstraße 23
10117 Berlin

Telefon +49/30/27 87 18 20
Telefax +49/30/27 87 18 18

gvhpreis@vf-holtzbrinck.de
www.vf-holtzbrinck.de

SCIENTIFIC AMERICAN nature Spektrum DER WISSENSCHAFT

KOMBINATORIK

Ein Sudoku benötigt mindestens 17 Vorgaben

Um diese Vermutung zu beweisen, haben Gary McGuire und seine Kollegen einen Supercomputer fast fünfeinhalb Milliarden Möglichkeiten durchprobieren lassen.

VON CHRISTOPH PÖPPE

Das Knobelspiel Sudoku (»einsame Zahlen«) eroberte vor etlichen Jahren von Japan aus die Welt und hat auch nach dem Abflauen der ersten Begeisterungswoge immer noch einen festen Platz in Tageszeitungen und auf Internetseiten. Es geht darum, ein quadratisches Brett aus 9 mal 9 Feldern so mit den Zahlen von 1 bis 9 zu füllen, dass jede der Zahlen in jeder Zeile, jeder Spalte und in jedem Teilkästchen der Größe 3·3 genau einmal vorkommt (Spektrum der Wissenschaft 3/2006, S. 100). Die Belegung gewisser Felder ist vorgegeben.

Ein Sudoku-Rätsel ist nur dann richtig gestellt, wenn diese Vorgaben die Lösung eindeutig bestimmen. Es darf also zu ein und derselben Vorgabemenge keine zwei vollständig und regelgerecht ausgefüllte Sudoku-Bretter geben.

Weit entfernt von dem kreuzworträtselartigen Zeitvertreib aus der Tageszeitung wetteifern die harten Sudoku-Profis darum, aus möglichst wenigen Vorgaben die komplette Belegung zu erschließen. Im Prinzip ist ein Rätsel umso schwerer, je weniger Information es bereitstellt. Die härtesten unter ihnen fordern vom Löser, aus nur 17 Vorgaben zu erschließen, was in die restlichen 64 Felder gehört (Bild oben). Der muss lange Wege im Irrgarten der potenziellen Lösungen zurücklegen, darunter sehr viele Sackgassen. Nur rechnen mit den Zahlen auf den Feldern muss er nicht, denn die haben, außer dass sie verschieden sind, keine Bedeutung und wären ohne Weiteres durch andere Symbole ersetzbar.

Jahrelangen Bemühungen zum Trotz hat noch niemand ein eindeutig lösbares Sudoku gefunden, das mit weniger als 17 Vorgaben auskommt. Inzwischen wissen wir, warum: Es gibt keins. Gary McGuire, Bastian Tugemann und Gilles Civario von der School of Mathematical Scienes des University College Dublin haben alle Möglichkeiten erschöpfend durchprobiert (http://arxiv.org/abs/1201.0749).

Ein solches mit »roher Gewalt« (englisch: brute force) erzieltes Resultat hinterlässt unweigerlich einen schalen Nachgeschmack. Natürlich wäre ein eleganter mathematischer Beweis, der alle Einzelfälle auf einmal erledigt, viel schöner gewesen; aber auf den wartet die Welt bisher vergebens. Dagegen ist bemerkenswert, wie es McGuire und seinen Kollegen gelungen ist, den Aufwand für die erschöpfende Durchsuchung auf ein praktikables Maß zu reduzieren. Denn die Zahl der zu überprüfenden Möglichkeiten ist wahrhaft gigantisch.

An dieser »kombinatorischen Explosion« scheitert schon die naheliegendste Idee: Man streue 16 Zahlen irgendwie auf die 81 Felder und teste, ob es zu dieser Belegung eine und nur eine Lösung gibt; das wiederhole man für alle denkbaren 16er-Belegungen. Da ist der umgekehrte Weg bereits um viele Zehnerpotenzen kürzer: Man prüfe für jede vollständige regelgerechte Belegung aller Felder, ob es eine Teilbelegung mit 16 Feldern gibt, die nur diese Lösung zulässt.

Nutzung von Symmetrien spart einen Faktor 10^{12}

Die Anzahl sämtlicher möglichen Lösungen ist mit ungefähr $6{,}7 \cdot 10^{21}$ zwar immer noch jenseits des Vorstellbaren; aber man muss nicht alle durchprobieren. Es ändert nichts Wesentliches, wenn man die neun Zahlen permutiert, das heißt jede durch eine andere – oder auch sich selbst – ersetzt, aber nie zwei verschiedene Zahlen durch dieselbe. Denn wenn es zu einer Lösung eine eindeutig bestimmende 16er-Teilbelegung gibt, gilt das auch für die permutierte Version und umgekehrt. Darüber hinaus darf man, ohne dass sich etwas Wesentliches ändert,

- das ganze Brett transponieren, das heißt an der Diagonalen von links oben nach rechts unten spiegeln, so dass Zeilen zu Spalten werden und umgekehrt;
- Streifen vertauschen; dabei besteht ein Streifen aus drei neben- oder übereinander angeordneten 3·3-Kästchen;
- innerhalb eines Streifens Zeilen beziehungsweise Spalten vertauschen.

Eine Spiegelung an der waagerechten oder der senkrechten Mittelachse oder an der anderen Diagonale ist aus den genannten Transformationen zusammensetzbar und muss daher nicht eigens berücksichtigt werden.

Fasst man jeweils alle Lösungen, die einander in diesem Sinn gleichwertig sind, zu so genannten Äquivalenzklassen zusammen, dann muss man sich nur noch mit einem Vertreter aus jeder Klasse beschäftigen. Eine vollständige

			8		1			
						4	3	
5								
				7		8		
						1		
	2			3				
6							7	5
		3	4					
			2			6		

Ein eindeutig lösbares Sudoku mit nur 17 Vorgaben

ALLE ABBILDUNGEN DIESES ARTIKELS NACH: MCGUIRE, G. ET AL., ARXIV:1201.0749V1 [CS.DS], 2012

Liste solcher Vertreter haben bereits 2006 Ed Russell und Frazer Jarvis bereitgestellt. Es sind nur noch lumpige 5,47 Milliarden Stück; mit geschickter Datenkompression passen sie sogar auf eine einzige DVD. Aber es wären immer noch pro Stück $3{,}4 \cdot 10^{16}$ Teilbelegungen mit 16 Feldern zu testen – viel zu viel Arbeit.

Auf der Suche nach einem geschickteren Verfahren kam den Mathematikern aus Dublin eine den Sudoku-Kennern geläufige Beobachtung zu Hilfe. Für ein fast gelöstes Sudoku mit nur noch vier freien Plätzen gibt es manchmal zwei verschiedene Ergänzungen; das ursprüngliche Rätsel ist dann nicht korrekt gestellt. So kann man im Bild unten die roten Felder so wie angegeben füllen oder unter Vertauschung der Zahlen 5 und 9. Ein korrekt gestelltes Sudoku, das diese Lösung haben soll, muss also mindestens eines der roten Felder durch eine Vorgabe festlegen, sonst ist die Eindeutigkeit dahin. Entsprechendes gilt für die grünen und die blauen Felder.

Die Mathematiker aus Dublin nennen eine Teilmenge wie zum Beispiel die der roten Felder eine »unvermeidliche Menge« (unavoidable set). Denn wegen der Eindeutigkeitsforderung ist es unvermeidlich, in mindestens ein Feld einer solchen Menge eine Vorgabe zu setzen. Stellen wir uns eine unvermeidliche Menge als ein beliebig dünnes Plättchen vor, wobei die einzelnen Felder durch sehr dünne Stege verbunden sind. Dieses Plättchen soll befestigt werden; dazu genügt es, wenn man an irgendeinem seiner Felder einen Nagel einschlägt, das heißt dort eine Vorgabe setzt.

9	3	7	8	5	6	2	4	1
5	6	2	1	9	4	3	8	7
4	8	1	2	7	3	5	6	9
8	2	3	6	4	7	9	1	5
6	1	5	9	3	2	4	7	8
7	4	9	5	8	1	6	2	3
3	7	8	4	6	9	1	5	2
1	9	6	7	2	5	8	3	4
2	5	4	3	1	8	7	9	6

Diese Sudoku-Lösung bleibt eine gültige Lösung, wenn man in den vier roten Feldern die beiden Zahlen (hier 5 und 9) vertauscht, desgleichen in den blauen und den grünen Feldern. Ein Rätsel mit dieser Lösung, das nicht aus jeder Farbgruppe wenigstens eine Zahl festlegt, ist nicht mehr eindeutig lösbar.

Kann man 360 Plättchen mit nur 16 Nägeln festnageln?

Zu einer gegebenen Lösung gibt es sehr viele Plättchen – im Durchschnitt um die 360 Stück, wenn man sich auf Plättchen mit bis zu zwölf Feldern beschränkt (verschiedene Lösungen haben verschiedene Plättchensortimente). Neben den genannten Viererplättchen gibt es noch größere, darunter Neuner, die nicht nur einen, sondern zwei Nägel erfordern (Bild rechts oben). Mehrere Plättchen, die ein und dasselbe Feld bedecken, kann man alle auf einmal durch einen einzigen Nagel in dieses Feld fixieren; aber es stehen insgesamt nur 16 Nägel zur Verfügung.

Also kommt es darauf an, die Stellen zum Festnageln möglichst geschickt zu wählen. Wenn bei einer optimalen Wahl lose Plättchen übrig bleiben, kann es zu dieser Lösung kein Rätsel mit nur 16 Vorgaben geben. Sind genau 16 Nägel ausreichend, prüfe man nach, ob das so definierte Rätsel eine eindeutige Lösung hat. Das ist nicht von vornherein klar; es könnte ja noch andere Quellen der Mehrdeutigkeit geben als die gefundenen Plättchen. Kommt das optimale Verfahren mit weniger als 16 Nägeln aus, so ergänze man die bis dahin erstellte Menge an Vorgaben auf jede mögliche Weise zu einem 16er-Rätsel und teste jedes auf eindeutige Lösbarkeit. Selbst in diesem Fall reduziert sich der Aufwand noch um mehrere Zehnerpotenzen gegenüber dem blinden Durchprobieren.

Nun braucht man nur noch ein Verfahren zum Bestimmen des optimalen Nagelungsmusters – und zwar ein möglichst effizientes. Wer alle denkbaren Muster der Reihe nach durchprobiert,

1			4			7		
4			7			1		
7			1			4		

Nagelt man von diesen neun Feldern eines fest, dann sind die beiden Zahlen, die der Nagel nicht getroffen hat, immer noch miteinander vertauschbar.

findet zwar mit Sicherheit das optimale, gewinnt aber nichts an Rechenzeit.

Ein naheliegendes Verfahren geht folgendermaßen: Man schlage den ersten Nagel dort ein, wo er den größten Nutzen stiftet, das heißt die meisten Plättchen fixiert. Dann finde man das Feld, auf dem man die meisten der jetzt noch losen Plättchen festnageln kann, und so weiter. Ein solcher Algorithmus wird in der Fachsprache »gierig« (englisch: greedy) genannt: Nimm in jedem Moment so viel, wie du kriegen kannst, ohne Rücksicht auf die Zukunft. In diesem Fall ist Gier ein schlechter Ratgeber. Man kommt zwar mit ziemlich wenigen Nägeln aus, aber nicht unbedingt mit der geringstmöglichen Anzahl. McGuire und seine Kollegen fanden ein raffiniertes Verfahren mit gebremster Gier, das mit Sicherheit das Optimum findet und nie zweimal über dieselbe Teilvernagelung nachdenkt.

Viel Mühe verwandten sie schließlich darauf, den Auftrag an den Computer so zu formulieren, dass die Stärken der Hardware genutzt wurden. So gelang es ihnen, die erforderliche Rechenzeit auf bescheidene 7,1 Millionen Stunden zu drücken – Prozessorstunden wohlgemerkt, also die Zeit, die ein einzelner Rechner mit der Aufgabe zubringen würde. Wenn aber 320 Rechenknoten mit je einem Dutzend Prozessoren sich gleichzeitig an die Arbeit machen,

wird die Zeitspanne überschaubar. Nach den Testläufen begannen die Rechenarbeiten im Januar letzten Jahres und waren im Dezember beendet.

Wozu ist das Ganze nutze? Selbst der hartgesottenste Sudoku-Spieler wird nicht behaupten, es diene dem Fortschritt der Menschheit, wenn man weiß, ob es eine extrem schwierige Form eines netten Zeitvertreibs gibt oder nicht. Diese Frage werden die drei irischen Mathematiker auch schwerlich als Forschungsziel in ihren Antrag auf Rechenzeit geschrieben haben. Aber was dann?

Es traf sich günstig, dass während der Vorbereitung der europäische Superrechnerverbund PRACE gegründet wurde (Spektrum der Wissenschaft 11/2011, S. 84). Da waren Übungsaufgaben gefragt: Probleme, an denen man die neuen, sehr verschiedenen Höchstleistungsrechner gegeneinander testen und die Programmierfähigkeiten schärfen konnte. Da kam das Sudoku-Problem gerade recht, denn es musste keinen Termin einhalten und ist gut auf viele parallele Rechner verteilbar: Zwei Prozessoren, die verschiedene Sudoku-Lösungen bearbeiten, brauchen sich ja nicht miteinander zu verständigen.

Darüber hinaus lässt sich die Aufgabe, die optimale Festnagelungsmenge (englisch: hitting set) zu finden, in ein Problem der Graphentheorie umformulieren. Das ist dann so abstrakt, dass eine Menge kombinatorischer Optimierungsprobleme in denselben formalen Rahmen passen, darunter auch ernstzunehmende. Auf diesem Umweg hat die Menschheit – vielleicht – doch etwas von der Lösung eines Spielproblems.

6	3	9	2	4	1	7	8	5
2	8	4	7	6	5	1	9	3
5	1	7	9	8	3	6	2	4
1	2	3	8	5	7	9	4	6
7	9	6	4	3	2	8	5	1
4	5	8	6	1	9	2	3	7
3	4	2	1	7	8	5	6	9
8	6	1	5	9	4	3	7	2
9	7	5	3	2	6	4	1	8

Zu dieser Lösung gibt es 29 korrekt gestellte Rätsel mit nur 17 Vorgaben – mehr, als zu jeder anderen Lösung bekannt sind. Gäbe es zu einer Lösung ein korrekt gestelltes Rätsel mit 16 Vorgaben, dann könnte man dieses auf 65 verschiedenen Feldern zu einem korrekten 17er-Rätsel erweitern. Der große Unterschied zwischen 29 und 65 ist ein Indiz dafür, dass der Versuch, mit 16 Vorgaben ein Sudoku festzulegen, nicht nur knapp gescheitert ist.

Christoph Pöppe ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

NEUROWISSENSCHAFT

Dialog zwischen Mensch und Maschine

Eine neuartige Gehirn-Computer-Schnittstelle vermittelt Gelähmten Tastempfindungen. Das erlaubt beispielsweise die Entwicklung präzise arbeitender Neuroprothesen.

VON CHRISTIAN WOLF

Geräte wie eine Tastatur oder eine Prothese allein mit der Kraft der Gedanken zu steuern – um dieses ambitionierte Ziel zu erreichen, arbeiten Forscher schon seit Längerem an speziellen Schnittstellen zwischen Gehirn und Computer (Brain-Computer-Interfaces, Abkürzung BCI). Damit sollen etwa Menschen mit starken körperlichen Behinderungen eines Tages künstliche Gliedmaßen möglichst präzise bewegen können.

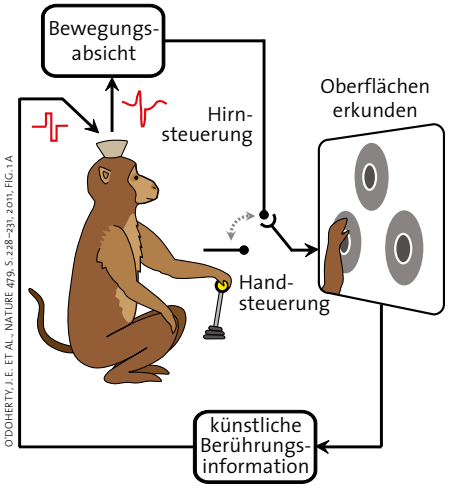
Die Gehirn-Computer-Schnittstellen nutzen dabei ein besonderes Phänomen: Wenn man sich eine Bewegung vorstellt, feuern Nervenzellen in ähnlichen Regionen der motorischen Großhirnrinde wie bei ihrem tatsächlichen Ausführen. Um ein Brain-Computer-Interface zu verwenden, genügt es daher im Prinzip, an eine Handlung nur zu denken.

Entsprechend registrieren Forscher beim Einsatz solcher Schnittstellen grundsätzlich zunächst die elektrischen Hirnaktivitäten, die bei der mentalen Vorstellung von Bewegungen des Nutzers auftreten. Das geschieht über Elektroden, die auf der Kopfhaut angebracht oder in das Gehirn implantiert worden sind.

Ein Computer lernt während einer Trainingsphase, mittels mathematischer Algorithmen jene neuronalen Aktivitätsmuster aus dem Datenstrom herauszufiltern, die für bestimmte Bewegungen relevant sind. Die derart gewonnenen Informationen lassen sich dann in Signale zum Steuern eines externen Geräts umwandeln.

Einbahnstraße vom Gehirn zum Computer

Doch bisher gleicht die Kommunikation zwischen Gehirn und Maschine nur einer Einbahnstraße, keinem Dialog: Die Daten gelangen ausschließlich vom Gehirn zum Computer. Ein herkömmliches Brain-Computer-Interface erlaubt zwar ein visuelles Feedback über einen Monitor. Das genügt, wenn



O'DOHERTY, J. E. ET AL., NATURE 479, S. 228–231, 2011, FIG. 1A

Bei diesem Gehirn-Computer-Gehirn-Interface registrieren Elektroden im primären Motorkortex Bewegungsabsichten, während simulierte Berührungsinformationen zum primären somatosensorischen Kortex gesendet werden.

den Nutzer etwa die Position eines Cursors oder eines Geräts interessiert. Bei neuronal gesteuerten Prothesen ist jedoch für eine präzise Koordination entscheidend, Berührungen zu empfinden und die Kraft zu registrieren, mit der die künstliche Gliedmaße zupackt. Nur Drucksignale sagen einem genau, ob man alles im Griff hat oder aber kurz davor ist, einen Gegenstand fallen zu lassen.

Eine solche dialogfähige Gehirn-Computer-Gehirn-Schnittstelle zu entwickeln, gelang kürzlich Forschern um Miguel Nicolelis von der Duke University in Durham, North Carolina *(Nature 479, S. 228–231, 2011)*. Dieses Interface meldet Berührungsempfindungen und damit die Beschaffenheit von Objekten an den Nutzer zurück. Hierfür ließen die Wissenschaftler zwei Rhesusaffen drei visuell völlig identisch erscheinende Kreise auf einem Computermonitor mit einem virtuellen Arm erkunden. Die Tiere sollten den einen davon erkennen, der mit einer besonderen, lediglich mit Hilfe des Tastsinns zu erfassenden Oberflächenstruktur ausgestattet war.

Die beiden Affen bedienten den Arm auf dem Bildschirm zunächst mit einem Joystick und später ausschließlich über ihre Hirnaktivitäten. Zu diesem Zweck hatten die Forscher ihren tierischen Probanden Mikroelektroden in den primären motorischen Kortex eingesetzt – in jenes Hirnareal, das willkürliche Bewegungen steuert. Die Gehirn-Maschine-Gehirn-Schnittstelle registrierte darüber die Aktivität einer Gruppe von 50 bis 200 Nervenzellen in der rechten Hirnhälfte. Diese Neurone kontrollieren die Bewegungen der linken Hand, mit der die Affen den Steuerhebel bedienten.

Damit die Tiere die Oberflächenstruktur der Kreise erforschen konn-

www.spektrum.de/aboplus

Der Premiumbereich – exklusiv für Abonnenten von **Spektrum der Wissenschaft**

SDW ABOPLUS

Abonnenten von **Spektrum der Wissenschaft** profitieren nicht nur von besonders günstigen Abokonditionen, exklusiv auf sie warten unter www.spektrum.de/aboplus auch eine ganze Reihe weiterer hochwertiger Inhalte und Angebote, unter anderem:

- Alle **Spektrum der Wissenschaft**-Artikel seit 1993 im Volltext
- Ein Mitgliedsausweis, dessen Inhaber in zahlreichen Museen und wissenschaftlichen Einrichtungen ermäßigten Eintritt erhält
- Vergünstigte Sonderhefte, kostenlose Downloads und das Produkt des Monats zum Spezialpreis
- Einen Preisnachlass beim Bezug von Spektrum.de-Premium, mit unserer wöchentlichen Digitalzeitung »Die Woche«

Spektrum DER WISSENSCHAFT Wissenschaft aus erster Hand

www.spektrum.de/aboplus

Wissenschaftspublikation im Umbruch

Macht das Internet Verlage überflüssig?

Früher blätterte ich in den Heften von »Nature« und Science«, um mich über naturwissenschaftliche Entwicklungen zu informieren; heute lese ich Wissenschaftsjournale online auf dem Bildschirm. Der mediale Paradigmenwechsel vom Druck zum Netz verändert aber nicht nur das Leseverhalten, sondern ist offenbar auch dabei, den Status von Redaktionen und Verlagen umzukrempeln.

Das geht nicht immer friedlich ab. Seit Kurzem boykottieren tausende Forscher den weltgrößten Verlag für Wissenschaftszeitschriften. Sie werfen dem niederländisch-britischen Konzern Elsevier vor, für seine Publikationen überhöhte Preise zu verlangen und den amerikanischen »Research Works Act« (RWA) zu unterstützen, der den freien Zugang zu Forschungsresultaten einschränken soll *(New Scientist 2852, S. 4, 2012)*. Noch ist offen, wie diese Auseinandersetzung zwischen öffentlich geförderter Forschung und privatwirtschaftlich organisierter Publikation ausgehen wird. Elsevier hat inzwischen in einem Punkt nachgegeben und sich vom RWA distanziert.

Der Konflikt wirft die Frage auf, ob wir in der Internetära überhaupt noch herkömmliche Wissenschaftsverlage brauchen. Physiker publizieren bereits das meiste online über arXiv.org. Doch wenn ich mich über neue Trends informieren möchte, rufe ich nicht arXiv auf, denn in der dort immer weiter anschwellenden Artikelflut würde ich schlicht ertrinken. Auch reichen die Kenntnisse eines Einzelnen längst nicht aus, um die Spreu vom Weizen zu trennen. Wissenschaftsredaktionen organisieren zu diesem Zweck eine Qualitätskontrolle durch den Peer-Review-Prozess: Fachkollegen bewerten die eingereichten Arbeiten und fordern meist Ergänzungen, bis nach oft mehrmaligem Hin und Her der Artikel schließlich erscheint.

Wir brauchen auch in der Netzära das Peer Reviewing, wenn wir nicht ausnahmsweise zu einer kleinen Gemeinde hoch spezialisierter Fachkollegen gehören – der erwähnte Boykott ging von Mathematikern aus. Tatsächlich entsteht für den Bereich der Teilchenphysik ein Modell, welches das Open-Access-Prinzip – den freien Zugang zu Forschungsarbeiten per Internet – mit der Begutachtung durch Fachkollegen kombiniert. Es nennt sich SCOAP3, für »Sponsoring Consortium for Open Access Publishing in Particle Physics«. Forschungsinstitute, Universitäten und Förderorganisationen finanzieren über ein internationales Konsortium das Peer Reviewing durch die Verlage. Diese gewähren dafür freien Zugang zu den Artikeln. Das Copyright verbleibt – anders als bisher – bei den Autoren *(Physik Journal 11, S. 3, 2012)*.

Für reine Fachpublikationen ist das ein großer Fortschritt – doch für interdisziplinäre Zeitschriften wie »Science« und »Nature« reicht solch ein Modell, das die Redaktionsarbeit nur auf Qualitätskontrolle beschränkt, nicht aus. In vielen Wissenschaftssparten bleibt eine redaktionelle Vorauswahl der online publizierten Artikel unumgänglich. Sonst gehen wir Leser – und ebenso die Peer Reviewer – in einem Wust von Texten unter. Die Kanalisierung der Informationsflut erfordert auch künftig Wissenschaftsredaktionen. Sie sorgen dafür, dass ich beispielsweise in »Science« oder »Nature« eine überschaubare, nach Inhalt und Relevanz vorsortierte Menge von Artikeln vorfinde.

So wird man auf vielen Gebieten zwar künftig ohne gedruckte Zeitschriften auskommen, aber – insbesondere im unübersehbaren Bereich der Bioforschung – nicht ohne Lotsen auf dem Meer der Onlineinformationen. Ein verallgemeinertes SCOAP3-Modell müsste darum nicht nur Peer Reviewer einbeziehen, sondern auch Fachredakteure. Diese werden daher, wie ich vermute, den bevorstehenden Paradigmenwechsel von der gedruckten Zeitschrift zur Onlinepublikation überleben.

Michael Springer

ten, ermöglichten die Forscher ihnen eine Art taktiles Feedback: Sie sorgten über weitere implantierte Mikroelektroden dafür, dass der primäre somatosensorische Kortex der Affen Signale erhielt, wenn auf dem Monitor der virtuelle Arm die Objekte berührte. Diese Hirnregion verarbeitet normalerweise Informationen, die von den berührungs- und druckempfindlichen Rezeptoren in der Haut einlaufen. In dem Experiment signalisierten elektrische Impulsserien mit unterschiedlichen Frequenzen jeweils verschieden beschaffene Objekte.

Berührungsinformationen entschlüsseln – ohne Haut

Mit Hilfe des Feedbacks lernten die Affen schnell, die derart simulierten Oberflächenstrukturen zu unterscheiden. Sie reagierten dabei laut den Forschern innerhalb einiger hundert Millisekunden auf die künstliche taktile Rückmeldung. Das entspreche dem Zeitrahmen, in dem normalerweise auch Berührungsreize auf der Haut interpretiert werden.

Er und seine Kollegen wüssten natürlich nicht, was die Tiere in dem Versuch tatsächlich wahrgenommen hätten, so Nicolelis. Aber es handle sich offensichtlich um eine künstlich erzeugte Empfindung. Demnach könne das Gehirn auch ohne Beteiligung der Haut taktile Informationen entschlüsseln, wenn der somatosensorische Kortex direkt stimuliert wird.

Das Wissenschaftlerteam sieht in dieser Art von Feedback einen entscheidenden Baustein zukünftiger, effektiver Neuroprothesen. Mit Hilfe solcher Gehirn-Computer-Gehirn-Schnittstellen könnten beispielsweise querschnittsgelähmte Patienten eines Tages nicht nur Prothesen mit Gedankenkraft bewegen, sondern auch die Beschaffenheit von Objekten feinfühlig erspüren – eine unabdingbare Voraussetzung für jegliches kontrollierte und koordinierte Arbeiten mit Ersatzgliedmaßen.

Christian Wolf ist promovierter Philosoph und freier Wissenschaftsjournalist in Berlin.

Liebe Leser von Spektrum der Wissenschaft:

Weil nur ein breites Spektrum Wissen schafft.

Tatsachen, Analysen und Hintergründe aus Politik, Wirtschaft und Forschung & Technik – jeden Montag im FOCUS.

Jetzt am Kiosk oder im Abo:
focus.de/abo

Erst im Jungpaläolithikum – der jüngeren Altsteinzeit – lebten Menschen lange genug, um sich an der Erziehung ihrer Enkel zu beteiligen.

MENSCHENEVOLUTION

Kultursprung durch Großeltern

Erfahrene Alte traten erst erstaunlich spät in der Menschheitsgeschichte nennenswert in Erscheinung. Zur gleichen Zeit entstand die moderne Kultur. Förderte die Lebensweisheit der Älteren diese Entwicklung?

Von Rachel Caspari

Als ich meine Urgroßmutter kennen lernte, war sie fast 100 Jahre alt und ich sechs. Es war in den Sommerferien des Jahres 1963. Wir lebten in Philadelphia und besuchten sie und andere Verwandte in Los Angeles. Meine Großmutter mütterlicherseits, ihre Tochter, kannte ich gut. Sie half meiner Mutter oft mit ihren drei kleinen Kindern. Die Frauen erzählten damals viel von früher – zum Beispiel davon, was die Familie am Ende des Amerikanischen Bürgerkriegs und in der bewegten Zeit des Wiederaufbaus danach erlebt und durchgemacht hatte. Durch die spannenden Geschichten erfuhr ich von meinen Wurzeln und dem vier Generationen umfassenden Netz von Familienmitgliedern, zu dem auch ich gehörte. Auf ähnliche Weise geben überall auf der Welt ältere Menschen ihr Wissen an Kinder und Enkel oder andere Verwandtschaft weiter. Und wie meine Großmutter stehen viele von ihnen den jüngeren Generationen materiell und mit Tatkraft zur Seite. Beides sind wesentliche Züge unserer Gesellschaften.

Allerdings war es wohl nicht immer so, dass eine größere Anzahl der Menschen ein Alter erreichte, in dem sie Enkelkinder hatten. Vielmehr dürften Großeltern als Regelfall in der Menschheitsgeschichte sogar eine ziemlich junge Erscheinung sein, kaum älter als einige zehntausend Jahre. Anscheinend handelt es sich dabei um eine Errungenschaft des so genannten modernen Menschen. Der Umschwung fiel zeitlich etwa mit der Phase zusammen, als sich im Jungpaläolithikum, also im letzten Abschnitt der Altsteinzeit, so genanntes modernes Verhalten etablierte – als sich unter anderem eine ausgefeilte symbolhafte Kommunikation durchsetzte, wie sie auch zu Kunst und Sprache gehört.

Hängen die beiden Entwicklungen wohl miteinander zusammen? Denkbar ist, dass die Zahl der Menschen deutlich anwuchs, als mehr von ihnen ein höheres Alter erreichten. Die größeren Populationen wiederum dürften den sozialen Austausch verstärkt und selbst die Evolution mancher genetischen Merkmale vorangetrieben haben. Erklärt sich durch die Vorteile dieses Wechselspiels womöglich auch der Untergang archaischer Frühmenschen wie des Neandertalers?

Aber der Reihe nach. Um festzustellen, seit wann mehr ältere Menschen lebten, müsste man die Altersstruktur der Populationen erfassen: den Anteil von Kindern, Erwachsenen im fortpflanzungsfähigen Alter sowie potenziellen Großeltern. Doch Paläontologen finden niemals ganze Populationen fossil vor, sondern meist einzelne Individuen, und auch von denen oft nur wenige Knochenfragmente. Zudem lässt sich selbst bei gut erhaltenen Überresten das Alter der Geschlechtsreife nicht leicht abschätzen. Wir wissen nicht genau, wie schnell die Kinder früherer Menschenformen heranwuchsen und in welchem Alter sie erwachsen wurden. Sogar bei heutigen Bevölkerungen ist das ja durchaus unterschiedlich.

Einige wenige Fundstätten enthielten immerhin in derselben Schicht ausreichend viele menschliche Fossilien, um Rückschlüsse auf das Todesalter einzelner Individuen ziehen zu können. Zu den berühmtesten zählt eine Karsthöhle bei Krapina in Nordkroatien. Der Paläontologe Dragutin Gorjanović-Kramberger (1856–1936) fand dort 1899 und in den Folgejahren Fossilien von etwa 70 Neandertalern, die meisten davon in einer zirka 130 000 Jahre alten Sedimentschicht. Manche der Knochen weisen gleiche erbliche Merkmale auf, die man sonst von Neandertalern so nicht kennt.

AUF EINEN BLICK

DIE EVOLUTION DES ALTWERDENS

1 Heute erleben die meisten Männer und Frauen die **Generation ihrer Enkel**. Doch noch vor wenigen zehntausend Jahren wurden nur wenige Menschen dafür alt genug.

2 Für die **Australopithecinen** wie für die **Neandertaler** in Europa waren lebende **Großeltern** etwas Außergewöhnliches – und zunächst auch für den modernen ***Homo sapiens***. Erst seit etwa 30 000 Jahren wird ein größerer Teil der Menschen älter als 30 Jahre.

3 Die immer höhere **Anzahl älterer Menschen** könnte eine wichtige Triebkraft für neuartige Werkzeuge und **Kunstformen** gewesen sein – zwei Entwicklungen, die sich gegenseitig förderten. Offenbar hatten die Neandertaler und andere archaische Menschen dieser kulturellen Beschleunigung nichts entgegenzusetzen.

VIKTOR DEAK

Es scheint sich hierbei um Mitglieder ein- und derselben Population zu handeln.

Wie so oft haben sich auch in Krapina Zähne am besten erhalten. Das kommt einer Altersanalyse zugute, nicht nur wegen der äußeren Abnutzungsspuren, sondern auch weil sich innere Zahnstrukturen altersabhängig verändern.

Was Zähne erzählen

Schon 1979 veröffentlichte der Paläoanthropologe Milford H. Wolpoff von der University of Michigan in Ann Arbor eine Studie zum erreichten Lebensalter der Krapina-Neandertaler. Er orientierte sich dabei am Durchbruch der drei hinteren Backenzähne (Molaren) und ihrem Abnutzungsgrad. Sie pflegen nacheinander mit größerem zeitlichem Abstand zu erscheinen. Als Anhaltspunkt nahm der Forscher eines der schnellsten Durchbruchsschemata beim heutigen Menschen. Nach seinen Analysen bekamen jene Neandertalerkinder den ersten hinteren Backenzahn mit ungefähr 6 Jahren, den zweiten mit 12 und den dritten mit 15.

Daraus folgt auch: Wenn der zweite hintere Backenzahn durchbricht, wurde der erste schon sechs Jahre lang benutzt, und so weiter. Zeigt ein erster Backenzahn 15 Jahre Abrieb, dürfte das Individuum ungefähr 21 Jahre alt geworden sein. War der zweite so lange in Gebrauch gewesen, zählte es 27 Jahre, beim dritten entsprechend etwa 30. Weil die Abnutzung recht gleichmäßig erfolgt, beträgt die Unsicherheit nur rund ein Jahr nach oben und unten. Am zuverlässigsten sind solche Analysen für eine Population, wenn Zahnfossilien von vielen Kindern und Jugendlichen verglichen werden können. Für Krapina trifft das zu: Wolpoff vermutete, dass die Überreste sämtlich von jungen Menschen stammten. Viele ältere Kinder waren dabei sowie junge Erwachsene, aber offenbar keine älteren Leute jenseits Ende 20.

Allerdings eignet sich diese Methode bei stark abgenutzten Zähnen nicht mehr gut zur Altersbestimmung älterer Individuen. Hatte Wolpoff darum womöglich etwas übersehen? Nachdem ich mich schon einige Jahre lang mit dem Lebensalter von frühen Menschen befasst hatte, beschloss ich 2005, mir das Krapina-Material nochmals mit einer neuen Methode anzusehen. Als Mitarbeiter gewann ich Jakov Radovčić vom Kroatischen Naturkundemuseum in Zagreb sowie an meiner Universität die Forscher Steven A. Goldstein, Jeffrey A. Meganck, Dana L. Begun und einige Studenten. Wir nutzten hochauflösende 3-D-Mikrocomputertomografie, die fossiles Material nicht zerstört.

Unser Augenmerk galt insbesondere dem Sekundärdentin, der harten Hauptmasse im Innern eines Zahns. Dieses Zahnbein bildet sich lebenslang, weshalb seine Menge auch bei abgenutzter Krone Rückschlüsse auf das Alter des Trägers erlaubt. Unsere ersten Ergebnisse – ergänzt von Scans des Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie in Leipzig – bestätigten Wolpoffs Befund. Somit wurde wohl tatsächlich keiner der Krapina-Neandertaler mehr als 30 Jahre alt. Das muss aber nicht bedeuten, dass Neandertaler niemals länger lebten: Einige wenige Individuen von anderen Fundorten dürften etwa ein Alter von 40 Jahren erreicht haben.

Trotzdem: Eine so geringe Lebenserwartung können wir uns heute kaum vorstellen. Mit 30 befinden wir uns gerade in der Blüte des Lebens. Auch Angehörige von Naturvölkern werden in der Regel über 30 Jahre alt. Doch unter den frühen Menschen stehen die Neandertaler von Krapina nicht allein da. Zu den wenigen anderen Fossilstätten mit vielen Individuen gehört die Sima de los Huesos (Knochengrube) von Atapuerca in Nordspanien, wo zahlreiche Überreste eines mutmaßlichen Neandertalervorläufers entdeckt wurden. Die dortigen Fundschichten reichen teils 600 000 Jahre zurück, und das Altersprofil der ausgegrabenen Frühmenschen ähnelt dem von Krapina. Viele von ihnen starben als Jugendliche oder junge Erwachsene. Die wenigsten erreichten das dortige Höchstalter von Mitte 30.

Nun könnten solche Fundsituationen auf Katastrophen zurückgehen – oder die Fossilierungsbedingungen verhinderten, dass Überreste älterer Personen erhalten blieben. Allerdings finden wir das charakteristische Altersmuster auch dann wieder, wenn wir ein größeres Spektrum des Fossilmaterials einbeziehen, also auch Orte mit Knochen von ganz wenigen Individuen. Demnach war jung zu sterben damals durchaus die Regel. Frei nach einem dem britischen Philosophen Thomas Hobbes (1588–1679) zugeschriebenen Spruch war das Leben der Vorzeit offenbar hart, grausam und kurz.

Schon vor diesen Dentinuntersuchungen, die eine recht genaue Altersaufschlüsselung erlauben, hatte ich zusammen mit der Anthropologin Sang-Hee Lee von der University of California in Riverside ein Forschungsprojekt begonnen, bei dem wir nach Anzeichen für unterschiedliche Lebenserwartungen im Verlauf der Menschenevolution fahnden wollten. Auch bei dieser Studie analysierten wir Zähne. Und zwar bewerteten wir deren Abnutzung – die zu der Zeit am besten geeignete Methode. Nach reiflicher Überlegung beschlossen wir, nicht die erreichten Lebensjahre zu ermitteln – das absolute Alter der Personen –, sondern die Fossilien grob bestimmten Alterskategorien zuzuordnen. Denn je weniger Individuen ein- und dieselbe Fundstelle und -schicht birgt,

umso schwerer lässt sich anhand des wenigen Materials das genaue Sterbealter abschätzen. Deswegen fragten wir einfach, ob eine Person das Großelternalter erreicht hatte – und welches Muster sich ergab, wenn man nach unserem Schema Zahnfossilien aus verschiedenen Phasen der Menschenevolution betrachtete. Als »alt« bezeichneten wir potenzielle Großeltern, als »jung« junge Erwachsene und ermittelten deren Zahlenverhältnis. Also: Welcher Anteil der Erwachsenen wurde zu verschiedenen Zeiten der Evolution »alt«?

Junge Großeltern der Steinzeit

Praktischerweise für unsere Studie brechen die dritten hinteren Backenzähne (unsere Weisheitszähne) bei Primaten ungefähr bei Eintritt der Geschlechtsreife durch – also wenn die Tiere erwachsen werden. Auch für Menschen galt das in der jüngeren Vergangenheit noch. Anhand von Befunden an Neandertalern und heutigen Naturvölkern schlossen wir, dass Frühmenschen ihre dritten hinteren Backenzähne mit rund 15 Jahren bekamen. Ungefähr in dem Alter mögen sie folglich auch ihr erstes Kind gehabt haben. Und mit etwa 30 konnten sie unter Umständen schon Großeltern werden.

Folglich zählten wir jedes Individuum, das mindestens 30 Jahre alt geworden war, als »alt«. An sich war das genaue Lebensalter für unsere Erhebungsmethode aber nicht so wichtig. Es kam uns ja nur darauf an, den Eintritt ins Erwachsenen- und ins Großelternalter zu erkennen – und das konnten wir, egal ob die Geschlechtsreife bei 10 oder bei 20 Jahren einsetzte. Die Vorgehensweise erlaubte uns, eine beträchtliche Anzahl von Fossilien auch aus weniger umfangreichen Fundstellen zu untersuchen. Auf diese Weise bestimmten wir anhand von Zahnfossilien bei insgesamt 768 Individuen die Kategorie des erreichten Lebensalters. Wir ordneten die Fossilien vier Gruppen, sprich Evolutionsepochen zu.

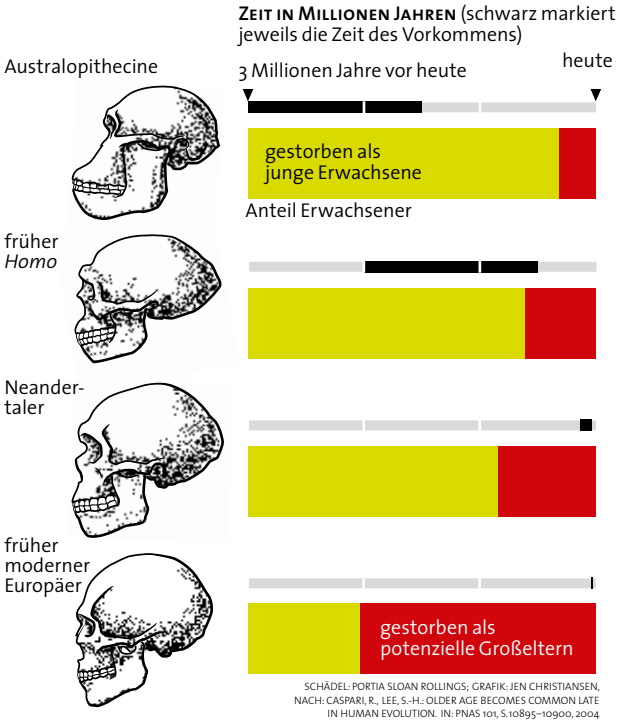
Die erste enthielt die jüngeren Australopithecinen von vor rund 3 bis vor 1,5 Millionen Jahren – Vormenschen von Ost- und Südafrika aus der Verwandtschaft von »Lucy«. Eine zweite Gruppe bildeten frühe Vertreter der Gattung *Homo*, die vor 2 Millionen bis vor 500 000 Jahren in Afrika, Asien und Europa lebten. Die dritte Gruppe umfasste die europäischen Neandertaler, 130 000 bis 30 000 Jahre alte Fossilien. Als vierte Gruppe betrachteten wir moderne Europäer der frühen jüngeren Altsteinzeit (des frühen Jungpaläolithikums) von vor rund 30 000 bis vor 20 000 Jahren – also Menschen, die bereits Zeugnisse einer hochstehenden Kultur hinterließen.

Mit einer Zunahme der Lebenserwartung hatten wir zwar gerechnet, aber das Ergebnis verblüffte uns doch. Denn nur zwischen den ersten drei Gruppen verzeichneten wir ein leicht ansteigendes durchschnittliches Sterbealter. Zwischen Neandertalern und europäischen Jungpaläolitikern gab es dagegen einen regelrechten Sprung: Das Verhältnis »alt« zu »jung« der Erwachsenen zum Zeitpunkt ihre Todes stieg plötzlich bei den Menschen den jüngeren Altsteinzeit um das Fünffache. Bei den Neandertalern gab es neben zehn Personen, die als junge Erwachsene gestorben waren, nur vier, die älter als 30 Jahre wurden. Ganz anders die Jungpaläolithiker:

Seit wann gibt es Großeltern?

Die Darstellung zeigt den Anteil der Erwachsenen (farbige Balken) der jeweiligen Evolutionsstufe (schwarz in der Zeitleiste), die nach Analysen von Zahnfossilien erst als potenzielle Großeltern (rot) starben, das heißt mit über 30 Jahren.

Die Australopithecinen, also Vormenschen, wurden fast nie so alt. Auch unter Frühmenschen (zweite Zeile) waren Großeltern noch selten. Selbst die Neandertaler starben meist recht jung – auch wenn sich beim Fossilvergleich schon eine etwas höhere Lebenserwartung der Erwachsenen abzeichnet. Beim modernen Menschen kehrt sich das Verhältnis um. Plötzlich tauchen – allerdings erst vor rund 30 000 Jahren, bei der frühen modernen Bevölkerung Europas – wesentlich mehr Fossilien von betagten Personen auf als von jungen Erwachsenen.



SCHÄDEL: PORTIA SLOAN ROLLINGS; GRAFIK: JEN CHRISTIANSEN, NACH: CASPARI, R., LEE, S.-H.: OLDER AGE BECOMES COMMON LATE IN HUMAN EVOLUTION. IN: PNAS 101, S. 10895–10900, 2004

Auf zehn »jung« Gestorbene kamen nun gleich 20 potenzielle Großeltern. Zuerst fragten wir uns, ob die vielen Grabfunde von modernen Menschen aus der jüngeren Altsteinzeit das Bild verfälscht hatten. Aber eine neue Berechnung ohne die Fossilien aus Bestattungen ergab Ähnliches. Offenbar wurde ein höheres Lebensalter tatsächlich erst sehr spät in der Menschheitsgeschichte von der Ausnahme zur Regel.

Wie mag sich dieser dramatische Wandel erklären? War das so deutlich längere Leben der Jungpaläolitiker etwa eine genetisch gesteuerte, rein biologische Eigenschaft, die sich mit dem modernen Menschen herausbildete? Oder verdankte es sich einem erst später erfolgten Verhaltenswandel?

Als der anatomisch moderne Mensch vor weit über 100 000 Jahren in Afrika entstand, hatte er noch lange nicht

das kulturelle Niveau wie viel später in Europa. Vielmehr stand er über Jahrzehntausende etwa auf der gleichen – der mittleren Altsteinzeit (dem Mittelpaläolithikum) zugerechneten – Technologiestufe wie der Neandertaler. Beide scheinen sich zwar gelegentlich an höherer Kultur versucht zu haben, und speziell der moderne Mensch besaß diesbezüglich offenbar ein lange unterschätztes Potenzial (siehe SdW 12/2009, S. 66 und 12/2010, S. 58). Aber vor der jüngeren Altsteinzeit waren das wohl eher Randerscheinungen.

Um zu entscheiden, ob der Sprung hin zu einem längeren Leben kulturell oder genetisch bedingt war, mussten wir anatomisch moderne Menschen untersuchen, die aber noch kein modernes Verhalten besaßen, sondern der mittleren Altsteinzeit zuzurechnen waren. Lee und ich nahmen uns dazu Mittelpaläolithiker vor, die vor rund 110 000 bis vor 40 000 Jahren in Vorderasien gelebt hatten. Wir verglichen sie mit Neandertalern derselben Region und desselben Zeitraums, die eine entsprechende, einfache Werkzeugindustrie besaßen – die somit unter ähnlichen geografischen und klimatischen Bedingungen lebten und auch in ihrer kulturellen Komplexität ähnlich waren. Tatsächlich ergab die statistische Auswertung diesmal zwischen Neandertalern und modernen Menschen keinen nennenswerten Unterschied im Verhältnis der beiden Sterbekategorien. Genauer gesagt enthielten beide Gruppen einen ungefähr gleich hohen Anteil an jung wie an betagt verstorbenen Erwachsenen. Damit wurden in Vorderasien also mehr Neandertaler »alt« als in Europa – und bei den modernen Menschen weniger. Ein rein biologischer Grund für den auffälligen Zuwachs der Lebensdauer bei den europäischen Jungpaläolitikern im Vergleich zu archaischen Menschenformen schied somit aus.

Moderne und archaische Menschen in Vorderasien

Dass es bei den Neandertalern des Orients verhältnismäßig mehr ältere Leute gab als unter ihren zeitgenössischen Verwandten in Europa, erstaunt nicht wirklich. Denn im Nahen Osten herrschte damals ein gemäßigteres, viel angenehmeres Klima als im eiszeitlichen Europa, was das Leben vermutlich leichter machte. Umso mehr beeindruckt allerdings die Langlebigkeit der frühen modernen Europäer in ihrer harschen Umwelt. Immerhin war das Verhältnis von alt zu jung verstorbenen Erwachsenen bei ihnen trotz des widrigen Klimas mehr als doppelt so hoch wie vorher bei modernen Menschen der mittleren Altsteinzeit in Südostasien.

Welche kulturellen Neuerungen diese Entwicklung ermöglichten, wissen wir nicht genau. Unzweifelhaft wirkte sich aber nun das Vorhandensein von mehr Älteren seinerseits auch günstig auf die Lebensumstände aus. Denn zumindest bei heutigen Jäger-und-Sammler-Völkern spielen Großeltern eine bedeutende Rolle. Nach wissenschaftlichen Erhebungen an traditionell lebenden Menschengruppen, wie sie etwa die Anthropologen Kristen Hawkes von der University of Utah in Salt Lake City und Hillard Kaplan von der University of New Mexico in Albuquerque durchführten, unterstützen Großeltern ihre erwachsenen Nachkommen in der Regel ökonomisch wie auch sozial nach Kräften. Das erlaubt diesen, selbst mehr Nachwuchs in die Welt zu setzen. Dank der Hilfe steigen zudem die Überlebenschancen der Enkel.

Aber Großeltern fördern und stärken ebenfalls in besonderem Maß komplexe Beziehungsgeflechte – so wie es meine Oma und meine Uroma taten, wenn sie mir von unserer weitläufigen Verwandtschaft erzählten. Unsere engeren sozialen Strukturen und unser Miteinander beruhen wesentlich auf solchem Wissen. Senioren vermitteln auch auf vielen anderen Gebieten Sachverstand und Erfahrungen. Das reicht bei traditionellen Kulturen vom Umgang mit Umweltbedingungen bis hin zu technischem Knowhow. Die Alten kennen sich zum Beispiel mit giftigen Pflanzen und mit Wasserstellen für Dürrezeiten aus. Sie wissen um die besten Tricks beim Körbeflechten oder Fertigen von Steinmessern.

Nach Untersuchungen eines Teams um den Mathematiker Pontus Strimling von der Universität Stockholm trägt das Wiederholen entscheidend zur Weitergabe von Regeln und Gepflogenheiten – also zur Tradierung – in einer Kultur bei. Deswegen werden wichtige Zusammenhänge besser überliefert, wenn mehrere Generationen zusammenleben und dieselben Sachverhalte immer wieder zur Sprache kommen. Schon in der Steinzeit könnte das außerdem bedeutet haben: Weil die älteren Menschen gern dafür sorgten, dass ihr soziales Wissen über Verwandtschaftsbeziehungen wie auch andere soziale Netze nicht verloren ging, stärkten sie immer wieder das Bewusstsein der jüngeren Generationen hierfür. Das förderte vermutlich die Pflege solcher Beziehungen – und dies war nicht zuletzt ein Rahmen für gegenseitige Hilfeleistungen, wenn Not am Mann war. Solcher Beistand mag seinerseits mit ein Grund dafür gewesen sein, dass mehr Menschen älter wurden.

Die gestiegene Lebenserwartung brachte vermutlich einen Populationszuwachs mit sich – nicht nur wegen der jetzt stark vergrößerten Altersgruppe der Senioren, sondern auch dadurch, dass die potenziellen Großeltern oft noch selbst im fortpflanzungsfähigen Alter waren. Und eine große Bevölke-

Kulturrevolution in der Altsteinzeit

Der große kulturelle Wandel von der mittleren zur jüngeren Altsteinzeit in Europa könnte darauf zurückzuführen sein, dass dort der Anteil älterer Menschen seit etwa 30 000 Jahren erheblich wuchs. Die hier gezeigte repräsentative Auswahl an Artefakten lässt klar erkennen: Vorher besaßen die Menschen eine vergleichsweise einfache Technologie; im Jungpaläolithikum fertigten sie hingegen viel komplexere Gerätschaften und schufen zudem Schmuck und Kunst.

SPITZE UND SCHABER: NATURAL HISTORY MUSEUM, LONDON; ZWEISEITIGER SCHABER: DAVID L. BRILL; WOLFSZAHN: RANDALL WHITE, NEW YORK UNIVERSITY; KNOCHENFLÖTE: GETTY IMAGES /AFP / SASCHA SCHUERMANN; STICHEL: DIDIER DESCOUENS / MUSÉUM DE TOULOUSE; VENUS FIGURINE: GETTY IMAGES / DANITA DELIMONT

rungszahl kann eine Triebfeder für neue Verhaltensmuster sein. Ob kulturelle Komplexität bestehen bleibt, hängt – laut Adam Powell vom University College London und seinen Kollegen – unter anderem von der Populationsdichte ab, die dafür hoch genug sein muss. Größere Populationen begünstigen demnach ausgedehnte Handelsnetze und verzweigte Kooperationssysteme. Zugleich scheint es die Menschen dann danach zu verlangen, ihre individuelle sowie ihre Gruppenidentität etwa durch Schmuck oder Körperbemalung auszudrücken. So deuten Anthropologen auch die vorübergehenden, durchaus bemerkenswerten frühen kulturellen Aufschwünge im südlichen Afrika.

Charakteristisch für die Menschen der jüngeren Altsteinzeit waren nun gerade Phänomene wie der verbreitete Gebrauch von Symbolen oder Werkzeuge aus besonderen, vor Ort nicht vorhandenen Materialien. Dass solches Verhalten damals so rasant zunahm, mag sehr wohl eine Auswirkung der anwachsenden Bevölkerung gewesen sein.

Möglicherweise beschleunigte die Populationszunahme sogar die menschliche Evolution. Nach Untersuchungen von John Hawks von der University of Wisconsin in Madison treten in einer größeren Bevölkerung mehr Mutationen auf, und vorteilhafte genetische Abweichungen können sich in den Folgegenerationen leichter ausbreiten. Solche Effekte dürften in unserer jüngeren Vergangenheit sogar noch gravierender geworden sein. Die Zahl der Menschen stieg deutlich, als vor 10 000 Jahren die Landwirtschaft einsetzte und die ersten Pflanzen domestiziert wurden. Damit gingen Ernährungsumstellungen einher. Neuerungen wie diese – oder auch Ortsveränderungen in klimatisch andere Gebiete – sorgten immer wieder dafür, dass andere Genvarianten Vorteile boten und sich darum in den betreffenden Populationen bald durchsetzten. Gregory Cochran und Henry Harpending von der University of Utah in Salt Lake City beschrieben viele solche genetischen Befunde. Das Spektrum reicht von Erbanlagen für die Hautfarbe bis hin zu neuen Genen für Verdauungsenzyme, etwa für Milchzucker (siehe auch SdW 3/2011, S. 28). Lebensdauer und kulturelle Neuerungen haben sich höchstwahrscheinlich schon in der jüngeren Altsteinzeit gegenseitig angetrieben. Vielleicht wurden die Menschen zunächst als Begleiteffekt irgendeines kulturellen Wandels etwas älter. Doch irgendwann bildete die Großelterngeneration schließlich ein festes Kennzeichen dessen, was Anthropologen unter Modernität und modernem Verhalten verstehen. Die damit einhergehenden Innovationen trugen ihrerseits zum Ansehen der Älteren bei – die möglichst lange leben sollten. Die Bevölkerung wuchs an, mit allen bekannten Folgen für Kultur und Erbausstattung. So gehören Alter und Weisheit eben doch zusammen. ~

DIE AUTORIN

Rachel Caspari ist Professorin für Anthropologie an der Central Michigan University in Mount Pleasant. Sie forscht über Neandertaler, die Anfänge des modernen Menschen und die Entwicklung der höheren Lebenserwartung.

QUELLEN

Caspari, R., Lee, S.-H.: Older Age Becomes Common Late in Human Evolution. In: Proceedings of the National Academy of Sciences USA 101, S. 10 895–10 900, 27. Juli 2004

Caspari, R., Lee, S.-H.: Is Human Longevity a Consequence of Cultural Change or Modern Human Biology? In: American Journal of Physical Anthropology 129, S. 512–517, April 2006

LITERATURTIPP

Die Evolution der Evolution. Spektrum der Wissenschaft Spezial 1/2009
Mit Artikeln über die heutige Menschenevolution, die Evolution menschlichen Denkens und Verhaltens sowie über den menschlichen Stammbaum

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1142714**

Wie die Sprache das Denken formt

Menschen leben in unterschiedlichen Kulturen und sprechen die verschiedensten Sprachen. Deren Strukturen prägen in ungeahntem Ausmaß die Art und Weise, wie wir die Welt wahrnehmen.

Von Lera Boroditsky

Pormpuraaw ist eine kleine Siedlung der Aborigines am Westrand der Halbinsel Cape York in Nordaustralien. Ich bitte ein fünf Jahre altes Mädchen, nach Norden zu zeigen. Ohne zu zögern, deutet sie in eine bestimmte Richtung. Mein Kompass bestätigt: Sie hat Recht. Nach meiner Rückkehr in die USA stelle ich dieselbe Frage in einem Hörsaal der Stanford University. Vor mir sitzen angesehene, mehrfach ausgezeichnete Gelehrte; manche besuchen seit 40 Jahren Vorträge in diesem Saal. Ich bitte sie, die Augen zu schließen und nach Norden zu zeigen. Viele weigern sich, weil sie keine Ahnung haben, wo Norden liegt. Die Übrigen denken eine Weile nach und deuten dann in alle möglichen Richtungen. Ich habe diesen Versuch nicht nur in Harvard und Princeton wiederholt, sondern auch in Moskau, London und Peking – stets mit demselben Resultat.

Eine Fünfjährige aus einer bestimmten Kultur bringt ohne Weiteres etwas fertig, was angesehene Forscher einer anderen Kultur überfordert. Was ist der Grund für die höchst unterschiedliche kognitive Fähigkeit? Die überraschende Antwort lautet: die Sprache.

Die Idee, dass Sprachunterschiede die Kognition beeinflussen, ist an sich jahrhundertealt; in Deutschland vertraten sie vor allem Johann Gottfried Herder (1744–1803) und Wilhelm von Humboldt (1767–1835). Seit den 1930er Jahren wird sie oft den amerikanischen Linguisten Edward Sapir (1884–1939) und Benjamin Lee Whorf (1897–1941) zugeschrieben. Die beiden untersuchten die Grammatik nordamerikanischer Indianer und mutmaßten: Wenn Menschen grundverschieden sprechen, dann denken sie auch unterschiedlich. Zwar fand die Idee zunächst großen Anklang, doch empirische Belege fehlten fast völlig.

In den 1970er Jahren verblasste der Ruhm der Sapir-Whorf-Hypothese. Sie wurde fast völlig zu Gunsten einer neuen Theorie aufgegeben, der zufolge Sprache und Denken universelles menschliches Gemeingut sind. Doch nun, Jahrzehnte später, liegen endlich überzeugende Indizien dafür vor, wie Sprache das Denken formt. Sie stürzen das lange herrschende Dogma von den Sprachuniversalien und liefern faszinierende Erkenntnisse über den Ursprung des Wissens und die Konstruktion der Wirklichkeit.

Der Einfluss der Wörter

Rund um den Globus kommunizieren Menschen miteinander auf vielfältige Weise, und jede der schätzungsweise 7000 Sprachen verlangt von denen, die sie verwenden, ganz unterschiedliche Leistungen. Angenommen, ich möchte Ihnen mitteilen, dass ich Anton Tschechows Drama »Onkel Wanja« auf einer Bühne in der 42. Straße New Yorks gesehen habe. Auf Mian, das in Papua-Neuguinea gesprochen wird, würde das Verb aussagen, ob das Stück soeben, gestern oder vor langer Zeit gespielt wurde. Das Indonesische dagegen gibt damit nicht einmal preis, ob die Aufführung bereits stattfand oder noch bevorsteht. Auf Russisch enthüllt das Verb mein Geschlecht. Wenn ich Mandarin verwende, muss ich wissen, ob Onkel Wanja ein Bruder der Mutter oder des Vaters ist und ob er blutsverwandt oder angeheiratet ist, denn für jeden dieser Fälle gibt es einen speziellen Ausdruck. Tatsächlich besagt die chinesische Übersetzung eindeutig, dass Wanja ein Bruder der Mutter ist. Und mit Pirahã, einer in Amazonien beheimateten Sprache, könnte ich »42. Straße« gar nicht ausdrücken, weil es darin keine exakten Zahlwörter gibt, sondern nur Bezeichnungen für »wenige« und »viele«.

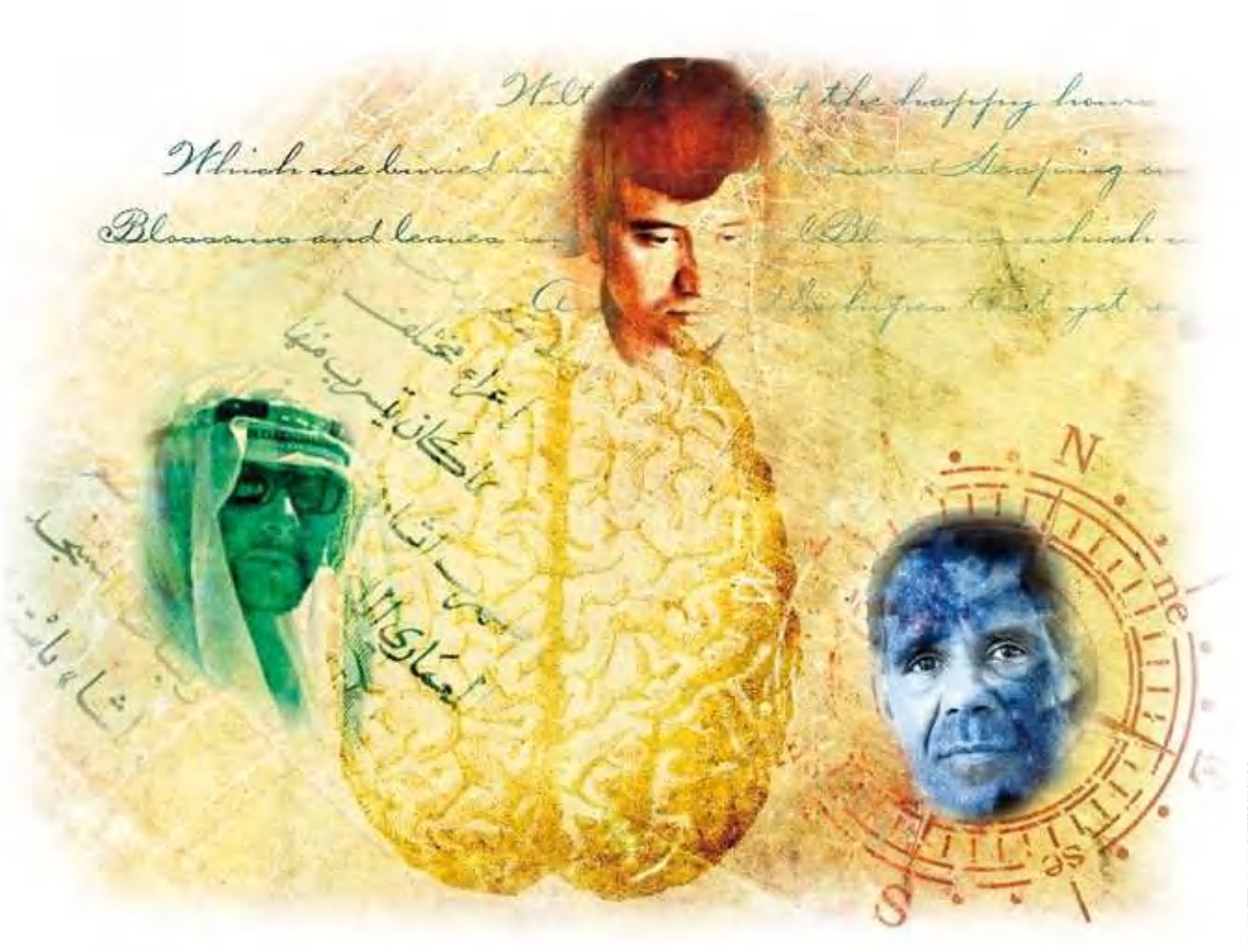
AUF EINEN BLICK

SPRECHEN, WAHRNEHMEN, DENKEN

1 Gelehrte diskutieren seit Langem, ob verschiedene Muttersprachen **unterschiedliche kognitive Fähigkeiten** nach sich ziehen.

2 In den letzten Jahren mehren sich empirische Indizien dafür, dass das Idiom der Muttersprache das Denken über viele Aspekte der Welt prägt – zum Beispiel über **Raum und Zeit**.

3 Nach neuesten Erkenntnissen werden auch unsere **Wahrnehmungen**, **Erinnerungen** und **Vorurteile** dadurch beeinflusst, welche Sprache wir jeweils verwenden.



JAN NEUFFER, WWW.NEUFFERDESIGN.DE

Sprache und Zeit: Für Europäer, die von links nach rechts zu schreiben gewohnt sind, liegt »früher« links von »später«; Araber ordnen die Zeit von rechts nach links; für australische Aborigines liegt »früher« im Osten.

Sprachen unterscheiden sich auf unzählige Arten voneinander, aber das muss nicht automatisch heißen, dass die Sprecher auch unterschiedlich denken. Lange war unklar, ob der Gebrauch von Mian, Russisch, Indonesisch, Mandarin oder Pirahã wirklich zu jeweils eigenen Wahrnehmungen, Erinnerungen und Überlegungen führt. Doch zahlreiche Forschungen – unter anderem in meinem Labor – haben inzwischen gezeigt, dass die Sprache sogar die grundlegenden Dimensionen menschlicher Erfahrung prägt: Raum, Zeit, Kausalität und die Beziehung zu anderen.

Kehren wir nach Pormpuraaw zurück. Anders als Englisch oder Deutsch enthält die dort gesprochene Sprache Kuuk Thaayorre keine relativen Raumausdrücke wie links und rechts. Wer Kuuk Thaayorre spricht, gebraucht absolute Hauptrichtungen wie Norden, Süden, Osten, Westen und so weiter. Zwar geschieht das auch im Deutschen, aber nur bei großen Entfernungen. Wir würden beispielsweise nie sagen: »Diese Banausen platzieren die Suppenlöffel südöstlich von den Gabeln!« Doch auf Kuuk Thaayorre werden immer Himmelsrichtungen verwendet. Darum sagt man etwa »Die Tasse steht südöstlich vom Teller« oder »Der südlich von Maria stehende Knabe ist mein Bruder«. Um sich in Pormpuraaw verständlich auszudrücken, muss man daher immer die Windrose im Kopf haben.

In den vergangenen zwei Jahrzehnten haben Stephen C. Levinson vom Max-Planck-Institut für Psycholinguistik in Nimwegen (Niederlande) und John B. Haviland von der University of California in San Diego nachgewiesen, dass Menschen, die Sprachen mit absoluten Richtungen verwenden, auffallend gut in unbekannten Gegenden oder Gebäuden zurechtkommen. Sie orientieren sich besser als Personen, die dort zu Hause sind, aber nicht solche Sprachen sprechen – ja sogar besser, als die Forscher dies für menschenmöglich gehalten hatten. Die Erfordernisse dieser Sprachen erzwingen und trainieren demnach eine erstaunliche kognitive Fertigkeit.

Wer anders über den Raum denkt, hat vielleicht auch eine andere Zeitvorstellung. Meine Kollegin Alice Gaby von der University of California in Berkeley und ich legten daher Kuuk Thaayorre sprechenden Aborigines Bildfolgen vor, die Zeitabläufe zeigten: Ein Mann altert, ein Krokodil wächst, eine Banane wird verspeist. Dann baten wir sie, die durchmischten Fotos zeitlich zu ordnen.

Wir führten den Test je zweimal durch, wobei die Person jedes Mal in eine andere Himmelsrichtung schaute. Jemand, der englisch oder deutsch spricht, ordnet die Bilder so, dass die Zeit von links nach rechts fortschreitet. Hebräisch oder arabisch Sprechende legen die Karten eher von rechts nach links. Dies zeigt, dass die Schreibrichtung beeinflusst, wie wir Zeit organisieren. Doch die Aborigines sortierten die Karten weder grundsätzlich von links nach rechts noch umgekehrt, sondern stets von Osten nach Westen. Wenn die Testperson so saß, dass sie nach Süden schaute, verliefen die Karten von links nach rechts. Schaute sie nach Norden, ordnete sie die Bilder von rechts nach links. Hatte die Person Osten vor sich, lief die Kartenfolge auf den Körper zu, und so weiter. Dabei sagten wir den Probanden nie, welche Himmelsrichtung sie vor sich hatten – die Aborigines wussten das ohnehin.

Zeit wird je nach Kultur ganz unterschiedlich dargestellt. Wir zum Beispiel betrachten die Zukunft als »vorn« und die Vergangenheit als »hinten«. Im Jahr 2010 entdeckte Lynden Miles von der University of Aberdeen (Schottland), dass englisch Sprechende unwillkürlich ihren Körper vorwärtsneigen, wenn sie an die Zukunft denken, und rückwärts bei Gedanken an die Vergangenheit. Aymara, eine in den Anden verbreitete indigene Sprache, verlegt die Vergangenheit dagegen nach vorne und die Zukunft nach hinten. Dem entspricht auch die Körpersprache: Wie Raphael Núñez von der University of California in San Diego und Eve Sweeter von der University of California in Berkeley 2006 feststellten, deuten die Aymara vor sich, wenn sie über die Vergangenheit reden, und hinter sich, wenn sie die Zukunft meinen.

MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de

Unser Online-Dossier »Sprache« finden Sie unter

www.**spektrum.de**/sprache&denken

Fassetten der Erinnerung

Die Sprache beeinflusst auch, wie Menschen Ereignisse beschreiben – und wie gut sie sich daran erinnern, wer was getan hat. Vorgänge darzustellen ist stets kompliziert, selbst wenn sie nur Sekundenbruchteile dauern, denn wir müssen sie rekonstruieren und deuten. Nehmen wir als Beispiel den Jagdunfall, bei dem der frühere US-Vizepräsident Dick Cheney seinen Freund Harry Whittington verletzte. Man könnte sagen »Cheney schoss auf Whittington«, wobei Cheney die unmittelbare Ursache ist, oder »Whittington wurde von Cheney angeschossen«, wodurch Cheney etwas in den Hintergrund tritt, oder »Whittington bekam eine Schrotladung ab«, wobei Cheney ganz aus dem Spiel bleibt. Der Vizepräsident selbst sagte: »Letztlich bin ich derjenige, der den Abzug betätigte, welcher die Ladung abfeuerte, die Harry traf.« Damit stellte er eine lange Ereigniskette zwischen sich und das Resultat. Eine noch raffiniertere Reinwaschung gelang Präsident George Bush mit dem Ausspruch: »Er hörte eine Wachtel auffliegen, drehte sich um, drückte ab und sah, dass sein Freund verwundet war.« Der Satz verwandelt Cheney vom Täter zum bloßen Zeugen.

Unsere Öffentlichkeit lässt sich von solchen sprachlichen Tricks allerdings kaum beeindrucken, denn Passivkonstruktionen wirken ausweichend – typisch für Drückeberger und Politiker. Wir bevorzugen sogar für ein Missgeschick meist aktive Transitivkonstruktionen wie »Hans zerbrach die Vase«. Hingegen erwähnt man im Japanischen oder Spanischen den Verursacher eher ungern. Auf Spanisch sagt man lieber »Se rompió el florero«, was übersetzt heißt: »Die Vase zerbrach sich.«

Wie meine Studentin Caitlin M. Fausey und ich 2010 herausgefunden haben, beeinflussen solche linguistischen Unterschiede die Rekonstruktion von Ereignissen, was beispielsweise Konsequenzen für Zeugenaussagen hat. Wir ließen englisch, spanisch und japanisch sprechende Personen Videos betrachten, auf denen zwei Männer entweder absichtlich oder unabsichtlich Luftballons zerstachen, Eier zerbrachen und Getränke verschütteten. Später mussten die Versuchspersonen einen Gedächtnistest bestehen. Für jedes Ereignis, das sie beobachtet hatten, sollten sie den Täter identifizieren – wie bei einer polizeilichen Gegenüberstellung. Eine andere Gruppe von englisch, spanisch und japanisch sprechenden Personen beschrieb dieselben Vorkommnisse. Was kam dabei heraus? Vertreter aller drei Sprachen beschrieben absichtliche Ereignisse aktiv – etwa »Er zerstach den Ballon« –, und alle erinnerten sich im Mittel gleich gut daran, wer diese Taten begangen hatte. Das zeigte auch, dass keine der Gruppen ein grundsätzlich schlechteres Gedächtnis aufwies. Doch wenn es um unabsichtliche Missgeschicke ging, ergaben sich deutliche Unterschiede. Spanisch und japanisch Sprechende waren weniger geneigt als englisch Sprechende, die Unfälle aktiv zu beschreiben – und sie erinnerten sich auch schlechter an die Verursacher.

Darüber hinaus beeinflusst die Struktur einer Sprache auch, wie leicht es ist, etwas Neues zu lernen. Zum Beispiel geben die Zahlwörter in manchen Sprachen die Dezimalstruktur eingängiger wieder als im Englischen, Deutschen oder Französischen; so gibt es im Mandarin keine Ausnahmen wie 11 oder Zifferndreher wie 13 oder 21. Darum lernen chinesische Kinder schneller, mit dem Dezimalsystem umzugehen. Und: Je nachdem, wie viele Silben die Zahlwörter haben, fällt es leichter oder schwerer, eine Telefonnummer zu behalten oder Kopfrechnungen auszuführen.

Von der Sprache hängt sogar ab, wie schnell Kinder herausfinden, ob sie Jungen oder Mädchen sind. Im Jahr 1983 verglich Alexander Guiora von der University of Michigan in Ann Arbor drei Gruppen von Kindern, die Hebräisch, Englisch oder Finnisch als Muttersprache hatten. Das Hebräische

bezeichnet das Geschlecht ausgiebig – sogar das Wort »du« variiert dementsprechend –, Finnisch macht keine solchen Unterschiede, und Englisch liegt dazwischen. Dementsprechend finden hebräische Kinder ihr eigenes Geschlecht rund ein Jahr früher heraus als finnische; englische nehmen diesbezüglich einen Mittelplatz ein.

Was formt was?

Aber rufen nun Sprachunterschiede unterschiedliches Denken hervor – oder ist es eher umgekehrt? Wie sich zeigt, trifft beides zu: Unsere Denkweise prägt die Art, wie wir sprechen, aber der Einfluss wirkt auch in der Gegenrichtung. Bringt man Menschen zum Beispiel neue Farbwörter bei, verändert dies ihre Fähigkeit, Farben zu unterscheiden. Lehrt man sie, auf eine neue Weise über Zeit zu sprechen, so beginnen sie, anders darüber zu denken.

Man kann sich der Frage auch anhand von Menschen nähern, die zwei Sprachen fließend sprechen. Nachweislich ändern bilinguale Personen ihre Weltsicht je nachdem, welche Sprache sie gerade verwenden. Wie zwei Studien 2010 zeigten, hängen sogar grundlegende Vorlieben und Abneigungen von der Sprache ab, in der danach gefragt wird. Teams um Oludamini Ogunnaike an der Harvard University sowie um Shai Danziger an der Ben-Gurion University of the Negev (Israel) studierten arabisch-französische Bilinguale in Marokko, spanisch-englische Zweisprachler in den USA und arabisch-hebräische in Israel. Dabei testeten sie die unausgesprochenen Neigungen der Teilnehmer. Beispielsweise forderten sie arabisch-hebräische Zweisprachler auf, unter verschiedenen Bedingungen auf Wörter mit einem schnellen Knopfdruck zu reagieren. Die Teilnehmer einer Gruppe sollten »M« drücken, sobald sie einen jüdischen Namen wie »Yair« oder eine positive Eigenschaft wie »gut« oder »stark« sahen; bei einem arabischen Namen wie »Achmed« oder einem negativen Wort wie »schlecht« oder »schwach« sollten sie »X« drücken. Bei anderen Probanden wurde die Paarung vertauscht, so dass nun jüdische Namen und negative Eigenschaften denselben Knopfdruck verlangten, während arabische Namen und positive Bewertungen zusammengehörten. Die Forscher maßen, wie schnell die Teilnehmer unter den beiden Bedingungen reagieren konnten.

Diese Aufgabe dient dazu, unwillkürliche oder automatische Voreingenommenheiten zu messen: etwa, wie selbstverständlich positive Eigenschaften und bestimmte ethnische Gruppen im Kopf der Leute zusammengehören. Je besser für die Menschen die beiden Vorstellungen harmonierten, bei denen sie auf denselben Knopf drücken sollten, desto schneller erfolgte die Reaktion.

Überraschenderweise verschoben sich bei den Zweisprachlern diese unwillkürlichen Vorurteile je nach der Sprache, in der die Tests durchgeführt wurden. Wenn die arabisch-hebräischen bilingualen Teilnehmer auf Hebräisch getestet wurden, zeigten sie gegenüber Juden eine positivere Grundhaltung als bei den gleichen Tests auf Arabisch. Anscheinend spielt die Sprache eine viel größere Rolle für unser geistiges Leben, als die Wissenschaftler früher annahmen. Selbst wenn Menschen einfache Aufgaben lösen – etwa Farbflecken unterscheiden, Punkte auf einem Bildschirm zählen oder sich in einem kleinen Raum orientieren –, brauchen sie die Sprache. Wie meine Kollegen und ich herausgefunden haben, sinkt die Fähigkeit, solche Aufgaben auszuführen, wenn man den Zugriff auf die Sprachfertigkeit einschränkt. Dies lässt sich bewerkstelligen, indem man die Versuchsperson zugleich mit einer anspruchsvollen verbalen Aufgabe wie dem Wiederholen einer Nachrichtensendung konfrontiert.

All diesen Forschungsergebnissen zufolge wirken die Kategorien und Unterscheidungen, die in speziellen Sprachen existieren, stark auf unser geistiges Leben ein. Was die Forscher »Denken« nennen, ist offenbar in Wirklichkeit eine Ansammlung linguistischer und nichtlinguistischer Prozesse. Demnach dürfte es beim Erwachsenen kaum Denkvorgänge geben, bei denen die Sprache keine Rolle spielt.

Ein Grundzug menschlicher Intelligenz ist ihre Anpassungsfähigkeit – die Gabe, Konzepte über die Welt zu erfinden und so abzuändern, dass sie zu wechselnden Zielen und Umgebungen passen. Eine Folge dieser Flexibilität ist die enorme Vielfalt der Sprachen. Jede enthält eine Art und Weise, die Welt wahrzunehmen, sie zu begreifen und mit Bedeutung zu füllen – ein unschätzbarer Reiseführer, den unsere Vorfahren entwickelt und verfeinert haben. Indem Wissenschaftler erforschen, wie die Sprache unsere Denkweise formt, enthüllen sie, wie wir Wissen erzeugen und die Realität konstruieren. Diese Erkenntnis wiederum hilft uns zu verstehen, was uns zu Menschen macht. ~

DIE AUTORIN

Lera Boroditsky ist Assistant Professor für kognitive Psychologie an der Stanford University (Kalifornien) und Chefredakteurin der Fachzeitschrift »Frontiers in Cultural Psychology«. Ihr Labor erforscht weltweit den Einfluss der Sprache auf die Kognition.

QUELLEN

Boroditsky, L., Gaby, A.: Remembrances of Times East: Absolute Spatial Representations of Time in an Australian Aboriginal Community. In: Psychological Science 21, S. 1635–1639, 2010

Danziger, S., Ward, R.: Language Changes Implicit Associations between Ethnic Groups and Evaluation in Bilinguals. In: Psychological Science 21, S. 799–800, 2010

Fausey, C. M. et al.: Constructing Agency: The Role of Language. In: Frontiers in Cultural Psychology 1, Artikel 162 (online), 2010

WEBLINKS

www.scientificamerican.com/feb2011/language
Weitere Quellen (englisch)

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1142708**

Auf dem Weg zur Quantengravitation

Sie ist die letzte große Lücke im Gebäude der Physik: eine Theorie, welche die Quantenphysik mit Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie vereint. Doch es gibt verschiedene Ansätze, wie das Problem gelöst werden könnte.

Von Claus Kiefer

Im Januar 1957 trafen sich Forscher an der University of North Carolina in Chapel Hill zu einer aufregenden Konferenz. Fast alle bedeutenden Gravitationsphysiker jener Zeit hatten sich versammelt, um eine Bestandsaufnahme ihres Fachgebiets zu versuchen. Die eine Hälfte der Tagung befasste sich mit Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie. Das ist die moderne Theorie der Gravitation, in der diese Wechselwirkung nicht mehr als Fernwirkungskraft zwischen Objekten mit Masse, sondern als Geometrie von Raum und Zeit gedeutet wird. Die Relativitätstheorie beschreibt alle mit der Schwerkraft verknüpften makroskopischen Erscheinungen: von unserer direkten Umgebung über Sonnensystem, Sterne und Galaxien bis hin zum Universum als Ganzem.

Die zweite Hälfte der Tagung befasste sich mit Verallgemeinerungen von Einsteins Theoriegebäude unter Einbeziehen der Quantentheorie. Eine solche erweiterte Theorie versehen Fachleute mit dem Etikett Quantengravitation. In gewissem Sinn vereint sie Mikro- und Makrokosmos, da die Quantentheorie hauptsächlich für die Beschreibung von Molekülen, Atomen und Elementarteilchen zuständig ist und die Gravitation für das Große und Ganze, etwa die gegenseitige Anziehung ganzer Galaxien. Doch trotz intensiver, jahrzehntelanger Bemühungen konnte bis heute noch keine allgemein anerkannte Theorie der Quantengravitation entwickelt werden. Allerdings existiert dafür eine Reihe mehr oder weniger aussichtsreicher Kandidaten, von denen ich die wichtigsten im Folgenden vorstellen werde.

Warum sollten wir uns überhaupt mit Quantengravitation befassen? Den vielleicht wichtigsten Grund erläuterte Richard Feynman (1918–1988) auf der Chapel-Hill-Konferenz. Der US-amerikanische Physiker benutzte dazu ein Gedankenexperiment in Anlehnung an den berühmten Stern-Gerlach-Versuch in der experimentellen Atomphysik (siehe Grafik S. 36). In diesem erstmals 1922 von Otto Stern und Walther Gerlach durchgeführten Versuch werden Elektronen durch ein Magnetfeld geschickt. Elektronen besitzen einen inneren Drehimpuls, den man Spin nennt und der in ihrem Fall lediglich die Werte +½ oder –½ in Bezug auf die Richtung des Magnetfelds annehmen kann. Je nach Orientierung des Elektronenspins werden die Teilchen unterschiedlich abgelenkt – etwa nach unten, wenn der Spin parallel zum Magnetfeld zeigt, oder nach oben, wenn der Spin antiparallel zum Magnetfeld orientiert ist. Dies lässt sich im Experiment durch ober- und unterhalb angebrachte Detektoren nachweisen.

Gemäß der etwas merkwürdigen Gesetze der Quantenmechanik kann sich das Elektron anders als klassische Partikel aber auch in einer Überlagerung (»Superposition«) beider Zustände befinden, also von Spin oben und Spin unten. Wie der Formalismus lehrt, entspricht das einem Zustand, in dem der Spin in eine Richtung senkrecht zum Magnetfeld weist. Feynman betrachtete nun einen solchen Überlagerungszustand: Er besteht aus einem Beitrag für den Weg nach oben sowie einem gleich großen Beitrag für den Weg nach unten.

Nun erweiterte der amerikanische Theoretiker den Stern-Gerlach-Versuch: Die beiden Detektoren werden mit einer Kugel makroskopischer Dimension verbunden. Durch einen

AUF EINEN BLICK

SCHWIERIGE SUCHE

1 Seit Jahrzehnten versuchen theoretische Physiker, Einsteins **allgemeine Relativitätstheorie** mit der **Quantentheorie** zu verknüpfen – bisher nur mit mäßigem Erfolg.

2 Es gibt mehrere Kandidaten für eine Lösung: Zu den direkten Quantenversionen von Einsteins Theorie zählen **Quantengeometrodynamik**, **Schleifentheorie**, **dynamische Triangulation** sowie **asymptotische Sicherheit**. Die **Stringtheorie** versucht, sämtliche Wechselwirkungen in einer Theorie zu vereinen.

3 Eine **experimentelle Prüfung** der bisherigen Theorien scheint zwar in weiter Ferne zu liegen. Doch erwarten Physiker Aufschluss aus Beobachtungen der kosmischen Hintergrundstrahlung etwa vom Satelliten Planck.

eingebauten Mechanismus bewegt sich die Kugel im Fall des nach oben weisenden Spins nach oben sowie für den nach unten weisenden Spin nach unten. Bei einer Überlagerung von Spin oben und Spin unten würde sich demnach eine makroskopische Überlagerung ergeben, in der sich die Kugel gleichzeitig nach oben und unten bewegt – vorausgesetzt, die Quantentheorie gilt auch auf diesen Skalen. Da die Kugel stets ein Gravitationsfeld hat, erhält man also eine Überlagerung von messbar verschiedenen Gravitationsfeldern. Ein solcher Zustand, so Feynman, könne jedoch nicht mehr durch Einsteins (klassische) Relativitätstheorie beschrieben werden, sondern erfordere unweigerlich eine Quantentheorie der Gravitation.

Bei seinem Gedankenexperiment handelt es sich um eine Variation von Schrödingers Katze, die, sperrt man sie in einen Kasten, gleichzeitig tot und lebendig sein kann – in Abhängigkeit zu einem radioaktiven Teilchen, das gemäß Quantentheorie als »noch nicht zerfallen« und »bereits zerfallen« zu gelten hat, solange kein Experimentator nachschaut und misst. Feynmans Gedankenexperiment führt uns vor Augen, dass bei universeller Gültigkeit der Quantentheorie die Superposition verschiedener Gravitationsfelder unausweichlich ist. Dass man makroskopische Überlagerungen wie diese aber nicht tatsächlich beobachten kann, liegt an dem Phänomen der so genannten Dekohärenz. Es entsteht durch die unvermeidbare Wechselwirkung des Systems (etwa Schrödingers Katze) mit der Umgebung, wobei die quantenmechanischen Überlagerungen des Zustands aufgehoben werden. Aber auch die Dekohärenz beruht auf dem Superpositionsprinzip der Quantentheorie.

Natürlich erwähnte Feynman die Möglichkeit, dass die Quantentheorie auf diesen Skalen womöglich nicht mehr

Die Raumzeit könnte unter dem Mikroskop eine Quantenstruktur enthüllen, die sich aus winzigen Raumzeitstücken zusammensetzt.

MPI FÜR GRAVITATIONSPHYSIK / MILDE SCIENCE COMMUNICATIONS

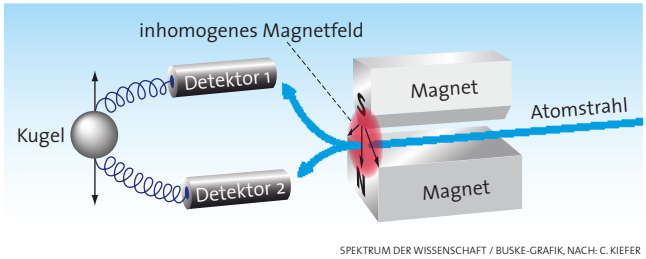
gültig ist und ein »Kollaps der Wellenfunktion« die Überlagerung vorher zerstört – eine Möglichkeit, die ihm offensichtlich nicht geheuer war. Physiker wie Lajos Diósi vom Forschungsinstitut für Teilchen- und Kernphysik in Budapest oder Roger Penrose von der University of Oxford versuchten solche Theorien für die Gravitation zu entwickeln, in denen die Wellenfunktion kollabiert. Die überwältigende Mehrheit der Physiker, die sich mit diesen Themen befassen, bevorzugt jedoch eine Theorie der Quantengravitation, in der das Superpositionsprinzip uneingeschränkt gilt. Das trifft auch für alle hier diskutierten Ansätze zu.

Das Problem der Quantengravitation treibt die Physiker schon seit dem Ende der 1920er Jahre um. Nachdem die Pioniere der Quantentheorie Werner Heisenberg und Wolfgang Pauli erste Schritte zu einer Quantentheorie des elektromagnetischen Felds unternommen hatten, beauftragte Pauli seinen Assistenten Léon Rosenfeld, eine solche auch für die Gravitation zu konstruieren. »Mit der Quantelung (des Gravitationsfelds) ist Rosenfeld zur Zeit hier beschäftigt. Leider sind noch mathematische Schwierigkeiten ungelöst ... Wir hoffen aber damit noch fertig zu werden«, schreibt Pauli Ende 1929 in einem Brief an seinen Kollegen Pascual Jordan, der damals gerade an die Universität Rostock berufen worden war. Fertig geworden sind die Theoretiker mit diesem Problem bis heute nicht. Warum ist Quantengravitation so schwierig?

Einstein hatte mit seiner allgemeinen Relativitätstheorie unsere Vorstellungen von Raum und Zeit grundlegend verändert. Bildeten beide seit Newton einen starren Rahmen für die Dynamik von Teilchen und Feldern, so sind sie hier in ihrer Vereinigung zur vierdimensionalen »Raumzeit« selbst Akteure im Geschehen geworden. Das neue Konstrukt beschreibt Geometrie und Gravitation gleichzeitig und ist deshalb ein eigenes dynamisches Gebilde.

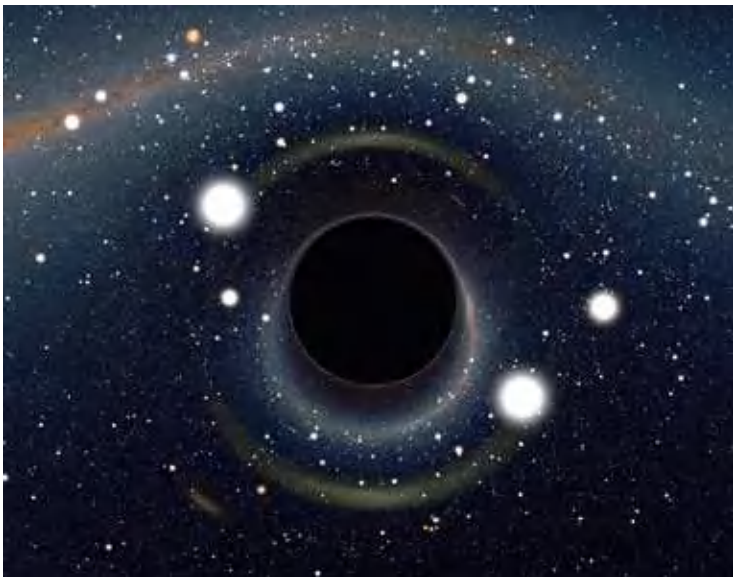
Verzerrungen der Raumzeit

Eine Quantentheorie der Gravitation wäre dann konsequenterweise auch eine Quantentheorie der Raumzeit, da Gravitation und Raumzeitgeometrie in diesem Rahmen ein und dasselbe sind. Bei den Quantentheorien der anderen Wechselwirkungen (etwa des Elektromagnetismus) konnten die Forscher immer davon ausgehen, dass die Quantenfelder »auf« einer vorgegebenen Raumzeit definiert sind. Diese



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK, NACH: C. KIEFER

Der Stern-Gerlach-Versuch in der Variante von Richard Feynman: Eine Kugel bewegt sich nach oben oder unten, je nachdem, durch welchen Detektor ein »Teilchen« fliegt – ein Fall für die Quantentheorie der Gravitation.



MIT FRDL. GEN. VON ALAIN RIAZUELO, IAP / UPMC / CNRS

Einen Schlüssel zur Quantengravitation stellen womöglich Schwarze Löcher dar (hier in einer Computeranimation).

fungiert mit ihren festen räumlichen und zeitlichen Dimensionen quasi als fester Hintergrund, der für die Formulierung solcher Theorien sogar mathematisch zwingend erforderlich war. Im Gegensatz dazu muss aber eine Quantentheorie der Gravitation »hintergrundunabhängig« sein. Das bedeutet eine große mathematische Herausforderung, die zum Teil neue Methoden für die Entwicklung einer solchen Theorie benötigt.

In einer ersten Näherung kann man schwache Gravitationsfelder allerdings auf einem vorgegebenen Hintergrund behandeln wie die anderen Naturkräfte auch. Eine wichtige Anwendung solcher Näherungen sind die von Einsteins Theorie vorhergesagten Gravitationswellen: Verzerrungen der Raumzeit, die sich wie elektromagnetische Wellen mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Zumindest indirekt haben Astronomen ihre Existenz nachgewiesen, da sie in Doppelsternsystemen die Bahnperiode schrumpfen lassen. Ein direkter Nachweis mit Hilfe von Laserinterferometern wird zwar an mehreren Orten auf der Erde versucht beziehungsweise geplant, unter anderem am GEO600-Experiment in der Nähe von Hannover, ist aber noch nicht geglückt.

Die Quantentheorie lehrt, dass elektromagnetische Wellen auch als Teilchen betrachtet werden können, die man Photonen nennt und die einen Spin mit dem Wert 1 besitzen. Entsprechend gehören zu Gravitationswellen Teilchen mit dem Spin 2 – die so genannten Gravitonen. Solange man die Wechselwirkung der Gravitonen untereinander vernachlässigt, lässt sich eine Theorie der Quantengravitation analog zur experimentell gut bestätigten Quantenelektrodynamik formulieren: der Quantenphysik elektromagnetischer Felder. Ein Problem entsteht jedoch, wenn die Wechselwirkung der Gravitonen ins Spiel kommt. Richard Feynman hat eine allgemeine Methode entwickelt, um damit fertigzuwerden.

NASA, KSC

Der Theoretiker Stephen Hawking erprobte 2007 auf einem Parabelflug, wie es sich anfühlt, schwerelos zu sein.

Während dies bei Theorien wie der Elektrodynamik gut funktioniert, stößt man bei der Gravitation allerdings auf eine zusätzliche, grundsätzliche mathematische Schwierigkeit, die man als Nichtrenormierbarkeit bezeichnet. Quantentheorien für Felder enthalten in der Regel mathematisch unendliche Größen, die also über alle Grenzen anwachsen können. Fachleute sagen dann: Sie divergieren. Die Unendlichkeiten rühren daher, dass in den Berechnungen beliebig kleine Abstände zwischen den Teilchen sowie beliebig große Impulse auftreten. Da jede physikalische Theorie aber nur endliche Größen enthalten sollte, versuchen Forscher die Unendlichkeiten durch bestimmte mathematische Tricks zu beseitigen. Wenn das klappt, nennen sie die Theorie renormierbar.

Wo die Relativitätstheorie »zusammenbricht«

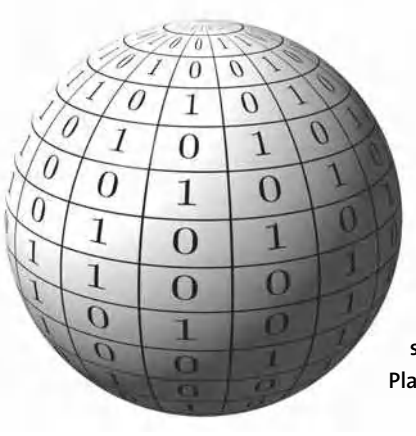
Wie gehen die Experten dabei vor? Dazu muss ich etwas auf das Handwerk des Feldtheoretikers eingehen. Renormierbare Theorien sind dadurch gekennzeichnet, dass man alle ihre Unendlichkeiten in eine endliche Zahl von experimentell zu bestimmenden Parametern stecken kann. In der Elektrodynamik sind das Ladung und Masse des Elektrons. Indem sie die Unendlichkeiten absorbieren und so aus den mathematischen Formeln entfernen, werden sie renormiert. Das klingt zwar wie Formelzauberei, klappt aber im Fall des elektromagnetischen Felds ausgezeichnet. Doch bei der Gravitation scheitert dieses Verfahren leider. Die in den Gleichungen auftretenden Unendlichkeiten sind beim Gravitationsfeld derart vielgestaltig, dass man zu deren Beseitigung ebenso unendlich viele Messparameter wie Ladung oder Masse bräuchte.

Ein mögliches Schlupfloch aus der Nichtrenormierbarkeit bietet eine neuartige Symmetrie: die Supersymmetrie, nach der am LHC des CERN in Genf gefahndet wird. Ansonsten gibt es nur die Alternative, eine Quantengravitation direkt zu konstruieren, ohne Bezug auf die divergenten Formeln in der Wechselwirkung von Gravitonen untereinander – mehr dazu unten.

Physik ist eine experimentelle Wissenschaft, und in diesem Zusammenhang fällt auf, dass es bisher noch keine eindeutigen Beobachtungen oder Experimente gibt, die zu ihrer Erklärung zwingend auch eine Theorie der Quantengravitation benötigen. Somit drängt sich die Frage auf, ob wir diese überhaupt brauchen. Reicht es vielleicht einfach aus, Einsteins Theorie in friedlicher Koexistenz mit der Quantentheorie zu betrachten? Leider geht das nicht – ein solches Zusammenleben würde irgendwann zu Widersprüchen führen. Darauf weist schon Feynmans Argument mit dem Stern-Gerlach-Experiment hin. Ein anderer Schwachpunkt ist in Forscherkreisen als das »Problem der Zeit« bekannt.

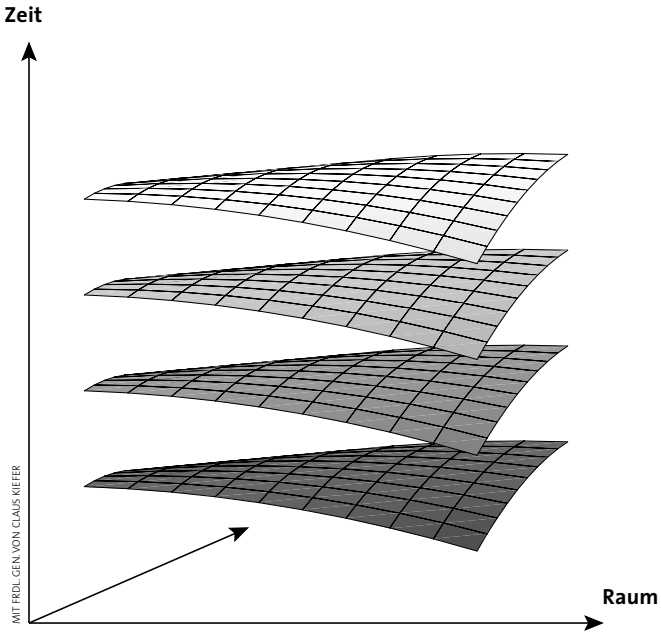
In der allgemeinen Relativitätstheorie bilden Raum und Zeit eng miteinander verknüpfte, dynamische Objekte. Die Quantenmechanik beruht dagegen auf Newtons absoluter Zeit. Selbst die modernere relativistische Quantenfeldtheorie kommt nicht ohne einen absoluten, unveränderlichen Hintergrund aus. Denn sie definiert die Felder auf dem starren Gerüst der vierdimensionalen Raumzeit der speziellen Relativitätstheorie. Da die Zeit auf fundamentalem Niveau aber nicht gleichzeitig dynamisch und absolut sein kann, können allgemeine Relativitätstheorie und Quantentheorie nicht beide exakt gültig sein. Dabei spielt es keine Rolle, dass unsere derzeitigen Beobachtungsmöglichkeiten noch nicht weit genug greifen, um den Widerspruch beider Theorien experimentell zu belegen.

Mit der Natur von Raum und Zeit verbindet sich noch ein weiteres Argument. Theoretiker haben schon vor Längerem gezeigt, dass Einsteins Theorie unweigerlich, also unter sehr allgemeinen physikalischen Umständen, die Existenz von Singularitäten voraussagt. Darunter versteht man Grenzen in der Raumzeit, hinter denen diese Theorie wegen mathematischer Divergenzen ihre Gültigkeit verliert, sozusagen zusammenbricht. In Singularitäten werden etwa die Krümmung der Raumzeit (ein Maß für die Stärke der Gravitation), die Temperatur oder die Dichte der Materie unendlich groß. Die einschlägigen mathematischen Theoreme haben Roger



MIT FREDL GEN. VON CLAUS KIEFER

Ein Maß für die Entropie eines Schwarzen Lochs: Bits, die symbolisch auf seinem Ereignishorizont verteilt sind – ein Bit pro Planck-Fläche



Vierdimensionale Raumzeiten lassen sich in eine Folge von dreidimensionalen Teilräumen auffächern. Der Quantenzustand des Universums wird auf solche »Raumschnitte« bezogen.

Penrose, Stephen Hawking von der University of Cambridge und andere in den 1960er Jahren bewiesen.

Anwenden lassen sich diese Resultate auf das Geschehen im Inneren von Schwarzen Löchern sowie auf den Anfang des Universums (und vielleicht auch auf sein Ende). Da die Theorie dort Singularitäten voraussagt, sind Einsteins Gleichungen für diese Ränder der Raumzeit nicht mehr anwendbar. Um solche bedeutsamen Situationen dennoch beschreiben zu können, benötigt man einen umfassenderen Rahmen, etwa die Quantengravitation.

Die Suche nach der Quantengravitation zählt somit zu den größten Problemen der theoretischen Physik. Erschwert wird sie durch das Fehlen eindeutiger experimenteller Hinweise. Doch auf welcher Größenordnung sollte man Effekte einer solchen Theorie überhaupt erwarten? Max Planck (1858–1947) hat 1899 die später nach ihm benannten Einheiten vorgestellt, die heute als Skala der Quantengravitation gelten. Er hat die drei wichtigsten Konstanten der Physik zu fundamentalen Einheiten einer Länge, einer Zeit und einer Masse verknüpft:

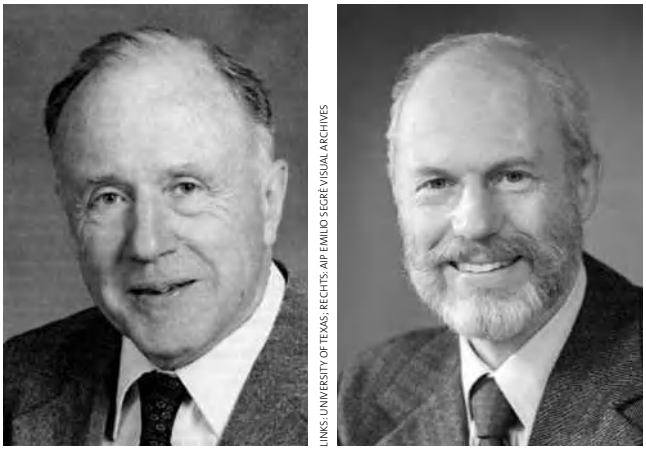
- die Planck-Länge mit rund 10^{-35} Meter,
- die Planck-Zeit mit etwa 10^{-44} Sekunden sowie
- die Planck-Masse mit zirka 10^{-5} Gramm, was dem 10^{19}-Fachen der Protonmasse entspricht.

Bei den Konstanten, aus denen sich diese Planck-Einheiten herleiten, handelt es sich um das für die Quantentheorie zentrale Wirkungsquantum (das Planck selbst erst ein Jahr später offiziell einführen sollte), außerdem die Lichtgeschwindigkeit und die Gravitationskonstante. Die Planck-Länge kann mit heutigen Methoden nicht direkt gemessen werden; das Gleiche gilt für die Planck-Zeit. Um ein Teilchen mit der Planck-Masse an einem herkömmlichen Beschleuniger wie dem Large Hadron Collider zu erzeugen, müsste dieser die wenig realistische Größe unserer Milchstraße haben. Die planckschen Skalen liegen also weitab jeder technischen Erreichbarkeit.

Vielleicht lässt sich die Quantengravitation aber über Umwege testen, nämlich über die Schwarzen Löcher (siehe SdW 3/2012, S. 38). Es handelt sich um Gebiete der Raumzeit, in denen die Gravitation so stark ist, dass nichts, nicht einmal Licht, aus ihnen entweichen kann. Diese Gebiete sind von ihrem Außenbereich »kausal abgekoppelt«, sie werden damit für einen Beobachter im Außenbereich nie Teil seiner Vergangenheit, sehr wohl aber seiner Zukunft sein können: einmal im Schwarzen Loch, immer im Schwarzen Loch. Die Grenze zu ihrem Außenbereich, in dem wir uns aufhalten, nennen Fachleute den Ereignishorizont. Für das Innere wird, wie Hawking und Penrose zeigten, eine Singularität vorhergesagt, ein Bereich unendlich großer Krümmung der Geometrie.

Diese seltsamen Objekte sind, wie Stephen Hawking 1974 verkündete, nicht vollkommen schwarz, sondern geben Wärmestrahlung ab. Insbesondere werden die Gebilde durch Abstrahlung immer heißer. Daher erwartet man am Ende seiner Verdampfung eine gewaltige Explosion mit hochenergetischer Gammastrahlung. Die Details dazu liegen allerdings noch im Dunkeln, da Hawkings »halbklassische Rechnung«, also mit Quantenfeldern auf einer klassischen Raumzeit, in der Endphase eben eine Theorie der Quantengravitation benötigt. Andererseits besteht die prinzipielle Möglichkeit, das Phänomen zu beobachten: Aus kosmischer Urzeit stammende (»primordiale«) Schwarze Löcher mit einer Anfangsmasse von etwa 10^{15} Gramm (das entspricht der Masse eines kleinen Asteroiden) hätten gerade die passende Lebensdauer, um beim gegenwärtigen Alter des Universums zu verdampfen.

Aus der Thermodynamik wissen wir, dass mit der Temperatur eines Körpers auch eine Entropie verknüpft ist. Etwas salopp als Maß seiner Unordnung bezeichnet, entspricht die Entropie der Zahl der Mikrozustände, die mit demselben Makrozustand verbunden sind. Bei einem idealen Gas etwa



Die Erfinder einer berühmten Gleichung: John Archibald Wheeler (1911–2008, links) und Bryce S. DeWitt (1923–2004)

wird der Makrozustand durch Druck, Volumen und Temperatur bestimmt, während der Mikrozustand durch die Zahl der Gasmoleküle (typischerweise 10^{23} pro Kubikzentimeter) gegeben ist. Befinden sich etwa in einem Kasten mit einer gegebenen Zahl von Gasmolekülen alle Teilchen in einer Ecke des Kastens, so liegt ein unwahrscheinlicher Zustand mit niedriger Entropie vor. Sind alle Partikel gleichmäßig über den Kasten verteilt, entspricht das einem wahrscheinlichen Zustand mit hoher Entropie.

Da Schwarze Löcher eine Temperatur haben, sollten sie auch eine Entropie haben. Thermodynamische Betrachtungen haben nahegelegt, dass dieser Wert proportional zu der Oberfläche des Ereignishorizonts wächst; Fachleute sprechen von der Bekenstein-Hawking-Entropie, benannt nach Stephen Hawking und dem israelischen Physiker Jacob Bekenstein, die diese Entropie in der ersten Hälfte der 1970er Jahre als Erste diskutierten. Doch was bedeutet sie bei so einem ungewöhnlichen Objekt? In welchem Sinn könnte ein Schwarzes Loch Mikrozustände aufweisen?

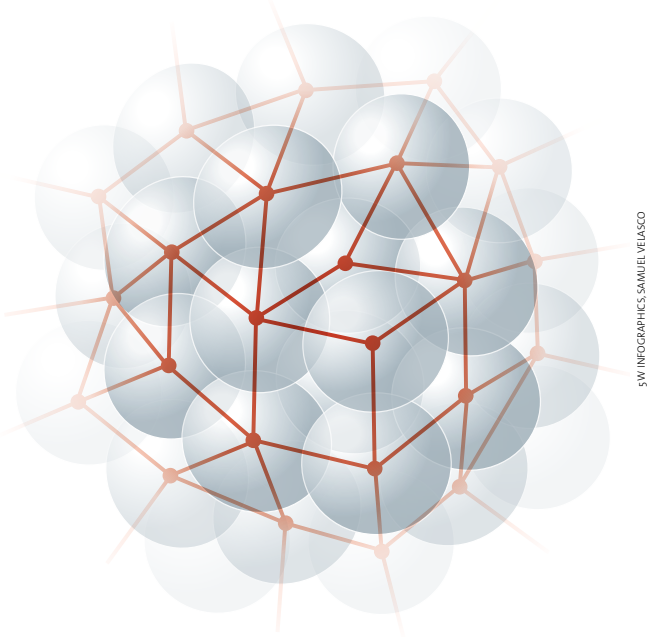
Nach einem mathematischen Theorem der Relativitätstheorie ist der Makrozustand eines Schwarzen Lochs durch maximal drei Parameter gekennzeichnet: Masse, Drehimpuls und elektrische Ladung – wobei in der Natur vorkommende Löcher vermutlich elektrisch neutral sind. Die Relativisten sprechen deshalb gerne auch von der »Haarlosigkeit« der Schwarzen Löcher (»no hair theorem«). Um die zugehörigen Mikrozustände zu kennen, bräuchten wir eine Theorie der Quantengravitation.

Reparatur einer mathematischen Problemzone

Der US-amerikanische Theoretiker John Archibald Wheeler stellte sich die unbekannten Mikrozustände eines Schwarzen Lochs so vor: Er teilte den Ereignishorizont in kleine Parzellen der Größe einer Planck-Länge im Quadrat ein und versah sie mit den Zahlen 0 und 1, also Bits (siehe Grafik S. 37). Die Entropie ist dann ein Maß für die Anzahl der Möglichkeiten, Nullen und Einsen über alle Zellen des Ereignishorizonts zu verteilen. Was sich hinter den Bits verbirgt, wusste freilich auch Wheeler noch nicht. Unterm Strich lässt sich sagen: Wegen der mikroskopischen Interpretation der Entropie Schwarzer Löcher und der möglicherweise beobachtbaren Endphase ihrer Entwicklung kommt diesen Objekten eine Schlüsselrolle bei der Suche nach der Quantengravitation zu.

Auf welche Weise versuchen Physiker nun eine Lösung zu finden? Auf Grund der mathematisch diffizilen Renormierbarkeit bereitet, wie bereits geschildert, auch eine Störungstheorie im üblichen Sinn für die Quantengravitation den Theoretikern Probleme. Welche Alternativen gibt es dazu?

Ein gewöhnliches Teilchen wird in der klassischen Mechanik durch seine Bahn beschrieben, eine Abfolge von Orten in der äußeren Zeit. In der Quantenmechanik gibt es jedoch keine solchen Bahnen mehr; das »Teilchen« wird dort mathematisch durch eine so genannte Wellenfunktion beschrieben, die den einzelnen Orten, wo es sein könnte, nur noch eine Wahrscheinlichkeitsamplitude zuordnet. Zusätzlich hängt



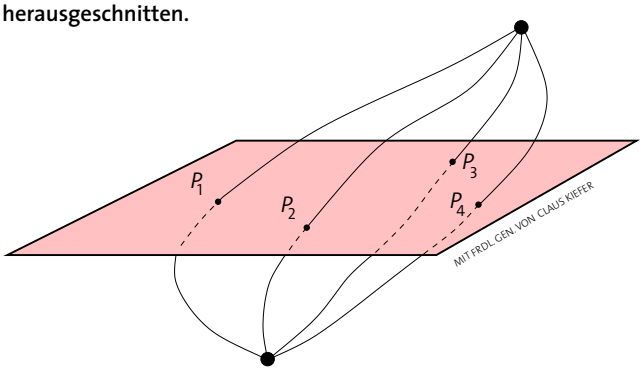
S+W INFOGRAPHICS, SAMUEL VELASCO

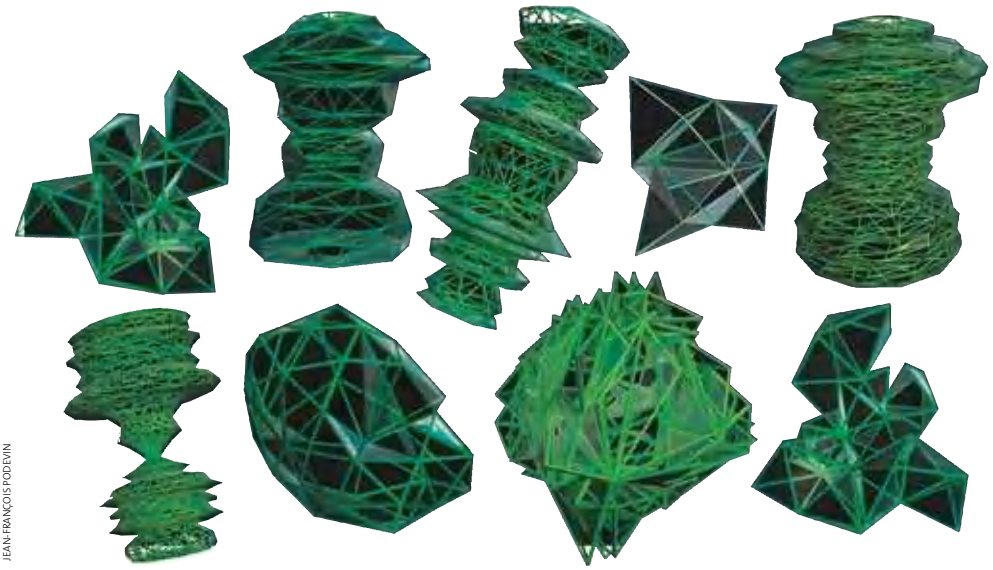
Was sind die Urelemente der Raumzeit? Vielleicht bestehen sie aus »Spin-Netzwerken«. Als »Atome« des Raums könnten sie unser bekanntes Universum in einer Näherung ergeben.

diese Wellenfunktion von der äußeren Zeit ab, die sie von der newtonschen Mechanik geerbt hat; ihre zeitliche Entwicklung wird durch die berühmte Gleichung beschrieben, die Erwin Schrödinger 1926 aufstellte. Der Teilchenbahn in der Mechanik entspricht in der allgemeinen Relativitätstheorie die vierdimensionale Raumzeit. Letztere kann man sich wie in einem Film als Abfolge dreidimensionaler Räume (den Verallgemeinerungen der Teilchenorte) vorstellen. Diese Auffächerung der Raumzeit in Räume ist in der Grafik links gezeigt; sie kann auf unendlich viele Weisen vollzogen werden. Im Unterschied zur Mechanik gibt es hier aber keine äußere Zeit mehr.

Wendet man den Formalismus der Quantentheorie auf Einsteins Theorie an, so verschwindet die vierdimensionale Raumzeit analog zur Teilchenbahn. Es verbleibt nur eine Wellenfunktion, die auf Basis der Menge aller möglichen dreidimensionalen Räume definiert ist. Die wichtigste Konse-

Aus Netzen wird Raum: Mit den Punkten P_1 bis P_4, wo die Linien des Spin-Netzwerks die Fläche durchstoßen, wird ein »Quantum« herausgeschnitten.





JEAN-FRANÇOIS PODEVIN

Zusammenbau von quantisierten Zellen zu Raumzeiten in der Theorie der dynamischen Triangulation: Die elementaren Tetraeder müssen nach bestimmten Regeln zusammengesetzt werden, damit die Überlagerung (Superposition) den Beobachtungen entspricht.

quenz: Da es in dieser Theorie keine äußere Zeit mehr gibt, spielt sie in der Quantengravitation auch keine Rolle – ein erstaunliches Resultat.

Der gleiche Weg, auf dem Schrödinger zu seiner Gleichung fand, führt hier zu einer Gleichung für die Quantenzustände des Gravitationsfelds. Nach wichtigen Vorarbeiten durch Paul Dirac (University of Cambridge), Peter Bergmann (Syracuse University), Asher Peres (Technion, Haifa) und andere wurde diese Gleichung 1967 von den damals an der University of Texas in Austin forschenden Physikern John Archibald Wheeler und Bryce S. DeWitt aufgestellt; man spricht deshalb von der Wheeler-DeWitt-Gleichung. Die Gleichung enthält keinen Zeitparameter mehr, sie beschreibt also nichts anderes als eine statische Wellenfunktion bezüglich der Menge aller dreidimensionalen Räume. Da die Vorgehensweise die von Einstein benutzte geometrische Beschreibung in die Quantentheorie überträgt, ist sie auch als Quantengeometrodynamik bekannt.

So paradox es klingt: Das Problem der Zeit hat sich in der Quantengravitation mit ihrem Verschwinden von selbst gelöst. Doch wie kann das sein? Schließlich scheint uns nichts selbstverständlicher als die Zeit. Die Sache verhält sich ungefähr so wie das Lesen dieses Textes. Er liegt gedruckt in zeitloser Form vor, und dennoch stellt sich bei der Lektüre die Illusion eines zeitlichen Vorgangs ein, bewirkt durch die Korrelation des Bewusstseins mit den Sätzen, die nacheinander gelesen werden. Auf ähnliche Art folgt unser üblicher Zeitbegriff aus der Wheeler-DeWitt-Gleichung. Die Schrödinger-Gleichung ergibt sich aus ihr als Näherung, jedoch korrigiert um Terme, welche Effekte der Quantengravitation beschreiben. Solche Effekte versuchen Astrophysiker zu beobachten.

Für den größten Teil der »klassischen« kosmischen Entwicklung, in der Quanteneffekte der Raumzeit kaum eine Rolle spielen, ist die Existenz der Zeit eine gute mathematische Näherung. Insofern ist auch das Standardmodell der Kosmologie in einer Theorie der Quantengravitation als Näherung enthalten. Obwohl die Quantengeometrodynamik sich auf natürliche Weise aus der Kombination von Quantenphysik und Einsteins Relativitätstheorie herleitet, gibt es mathematische Schwierigkeiten, die einem vollen Verständnis der exakten Wheeler-DeWitt-Gleichung im Weg stehen. Forscher haben deshalb nach Alternativen gesucht, welche zwar die grundlegende Struktur dieser Theorie beibehalten, aber andere Variablen benutzen. Die wichtigste Alternative ist heute als Schleifenquantengravitation bekannt (englisch: loop quantum gravity).

Wie der Raum aus Elementarschleifen entsteht

Wie der Name andeutet, spielen hier eindimensionale geschlossene Wege (Loops oder Schleifen), die innerhalb des dreidimensionalen Raums verlaufen, eine Rolle. Statt Variablen, die an jedem Punkt im Raum separat sitzen, benutzt man hier einerseits Größen, die direkt auf einer Schleife definiert sind, und andererseits Größen, die dem Fluss eines Felds durch die von der Schleife umrandete Fläche entsprechen; letztere sind analog zum Fluss des elektrischen Felds in der Elektrodynamik. Das hat den Vorteil, dass die mathematischen Schwierigkeiten, die mit einzelnen Raumpunkten verknüpft sind, hier vermieden werden. Statt ausdehnungsloser Punkte legt man der Theorie jetzt eindimensionale Schleifen und zweidimensionale Flächen zu Grunde. Die neuen Variablen heißen entsprechend »Schleifenvariablen«.

Tatsächlich geht die Vorstellung aber über das Bild von Schleifen in einem vorgegebenen dreidimensionalen Raum weit hinaus. Vielmehr soll – und das ist das Revolutionäre an dem Konzept – der Raum selbst erst aus diesen Strukturen entstehen. Es gibt eben keinen Hintergrund mehr, der als fester Raumzeit-Rahmen für die physikalischen Felder dienen könnte. Es geht darum, den Raum aus einzelnen, voneinander verschiedenen (»diskreten«) Graphen aufzubauen. Graphen sind abstrakte Strukturen, deren Objekte Knoten bilden, die über Kanten in einem Netzwerk miteinander verbunden sind.

Die Idee, Graphen als Ausgangsstruktur zu benutzen, hatte bereits Roger Penrose im Jahr 1971. Der britische Theoreti-

ker schuf dafür so genannte Spin-Netzwerke. Das sind spezielle Graphen, deren einzelne Abschnitte mit ganz- oder halbzahligen Werten charakterisiert werden (siehe Grafik S. 39 oben). Solche Gitternetze entwarf Penrose analog zum Spin von Teilchen in der Quantenmechanik. Allerdings handelt es sich dabei nicht um Teilchen im üblichen Sinn, sondern um fundamentale »Freiheitsgrade« des Gravitationsfelds. Die Spin-Netzwerke bilden in diesem Konzept die elementaren Bausteine, aus denen der Raum aufgebaut ist.

Der Charme von Penroses Spin-Netzwerken besteht darin, dass sie sich auf sozusagen natürliche (mathematische) Weise aus der Schleifentheorie ableiten lassen. Wie die Vertreter dieser Theorie gezeigt haben, können die Quantenzustände der Theorie aus solchen Netzwerken aufgebaut werden. Aus der diskreten Struktur dieser Schleifen folgt, dass der daraus entstehende Raum in gewissem Sinn ebenfalls eine diskrete Struktur, und damit eine bestimmte Körnigkeit, aufweist.

Ein Beispiel: Angenommen, eine gewöhnliche (zweidimensionale) Fläche wird von einem Teil eines Spin-Netzwerks durchstoßen (siehe Grafik S. 39 unten). Das ordnet ihr einen Flächeninhalt zu, der sich aus der Anzahl der Durchstoßpunkte ergibt und ein Vielfaches eines elementaren Flächenquantums beträgt; der Inhalt dieses Flächenquantums entspricht ungefähr der planckschen Länge im Quadrat, also unglaublich winzigen 10^{-66} Quadratzentimetern. In einer quantisierten dreidimensionalen Welt hat demnach die kleinste physikalisch sinnvolle Volumeneinheit eine Größe von etwa 10^{-99} Kubikzentimetern. Physikalisch spürbar ist diese Körnigkeit freilich nur auf kleinsten Maßstäben, eben im Bereich der Planck-Länge – fern jeder direkten Messbarkeit. Für größere Skalen, also etwa schon im atomaren Bereich, liegen die möglichen Werte so dicht beisammen, dass für alle Beobachter der Eindruck eines Kontinuums entsteht.

Bei den Spin-Netzwerken könnte es sich nun um die gesuchten mikroskopischen Freiheitsgrade handeln, aus denen die Entropie eines Schwarzen Lochs folgt. Dazu betrachtet man – wie in dem genannten Beispiel – die Durchstoßpunkte des Netzwerks mit der Horizontoberfläche des Objekts. Durch ein ausgeklügeltes Abzählverfahren lässt sich nun tatsächlich eine Formel finden, die der gesuchten Entropie von

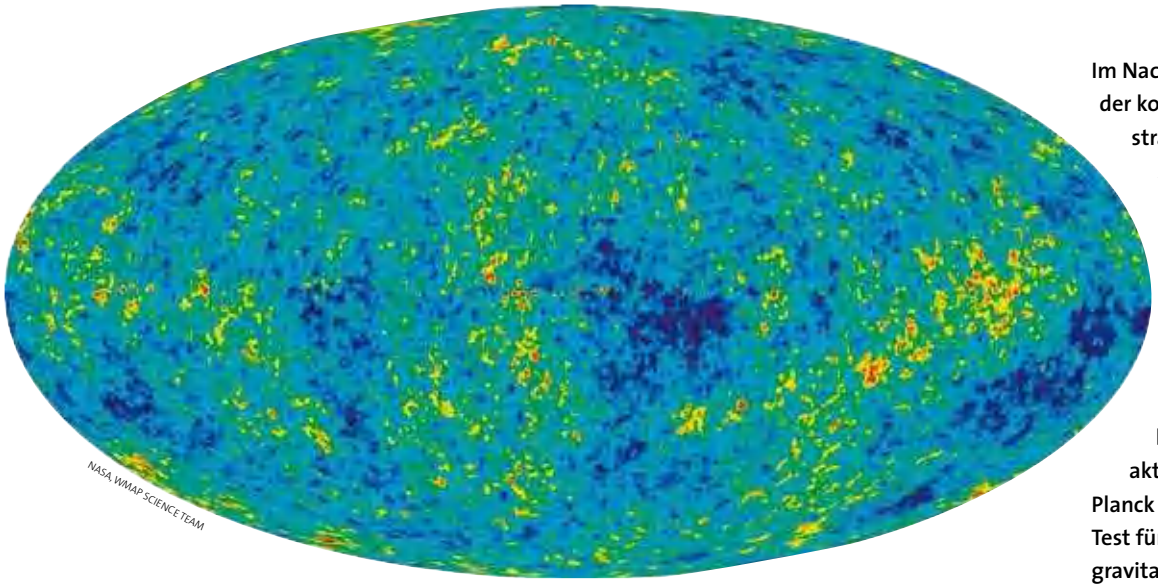
MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON MARTIN REUTER

Der Physiker Martin Reuter von der Universität Mainz befasst sich mit einer Theorie der Quantengravitation, die »asymptotische Sicherheit« genannt wird und auf den amerikanischen Physiker Steven Weinberg zurückgeht. Die Idee: eine Quantentheorie zu konstruieren, die auch noch bei kürzesten Längen ihre Vorhersagekraft behält.

Hawking und Bekenstein ähnelt. Im Hinblick auf die Natur der Zeit teilt die Schleifentheorie die entsprechende Eigenschaft der Geometrodynamik: Auch ihre grundlegenden Gleichungen sind zeitlos. Darüber hinaus entwirft die Schleifentheorie das faszinierende Bild einer mikroskopischen Welt, in der es keinen kontinuierlichen Raum mehr gibt, sondern nur eine Vielzahl von diskreten Strukturen. Wie sich hieraus im Einzelnen unsere beobachtete makroskopische Welt ergibt, ist bislang offen. Obwohl sie das gleiche Ziel vor Augen hat, ist die Theorie damit komplementär zur Quantengeometrodynamik. Dort ist der Bezug zur beobachteten Welt klar, die Details ihrer mikroskopischen Beschaffenheit entziehen sich jedoch noch unserem Blick; in der Schleifentheorie ist es gerade umgekehrt.

Richard Feynman hat in den 1940er Jahren einen ausgeklügelten Formalismus entwickelt (das feynmansche Pfadintegral), in dem sich die quantenmechanische Wellenfunktion als Summe über alle möglichen fiktiven Pfade ausdrücken lässt, welche etwa Elektronen oder Moleküle durchlaufen können. Das ist wohlgemerkt ein mathematischer Trick, denn gemäß der Quantenmechanik gibt es ja keine Bahnen. Feynmans Formalismus ist elegant und erfreut sich einer Vielzahl von Anwendungen, unter anderem in der Festkörper- und Elementarteilchenphysik. Es ist deshalb nicht verwunderlich, dass er auch Eingang in die Quantengravitation findet. Dort summiert man nicht über alle möglichen Teilchenpfade, sondern über alle möglichen vierdimensionalen Raumzeiten, die dann so fiktiv sind wie vorher die Teilchenpfade.

Im Pfadintegralzugang zur Quantengravitation muss man also über alle möglichen Geometrien der vierdimensionalen Raumzeit summieren, um zu dem gewünschten Quantenzustand zu gelangen – selbst für Experten kein einfaches Unterfangen. Im Wesentlichen hat man die Wahl zwischen groben Näherungen und aufwändigen numerischen Rechnungen. Im zweiten Fall gab es in jüngerer Zeit interessante Entwicklungen mit der Methode der »dynamischen Triangulation«, wie sie vor allem in Arbeiten der Theoretiker Jan Am-



Im Nachleuchten des Urknalls, der kosmischen Hintergrundstrahlung (hier in einer Aufnahme des Satelliten WMAP), könnten Forscher auf Spuren von Quanteneffekten stoßen. So sollten bestimmte Anisotropien der Strahlung (gelbe und blaue Flecken), wie sie aktuell vom Satelliten Planck vermessen werden, als Test für die Quantengravitation dienen.

bjørn von der Universität Kopenhagen, Jerzy Jurkiewicz (Universität Krakau) und Renate Loll (Universität Utrecht) entwickelt worden sind. Dabei wird zunächst nicht die Raumzeit, sondern der dreidimensionale Raum in Tetraeder zerlegt, wie in der Grafik S. 35 gezeigt (siehe ihren Artikel in SdW 2/2009, S. 24). Diese dreidimensionalen Teilstücke werden dann von einem diskreten Zeitpunkt zum nächsten verbunden, wodurch vierdimensionale Simplizes (also kleine Stücke der Raumzeit) entstehen. Um aus diesen Teilstückchen den gesamten Quantenzustand zu erhalten, summiert man dann bei festgehaltenen Seitenlängen über alle möglichen Kombinationen der Teilgebilde.

Wie viele Dimensionen hat der dreidimensionale Raum?

Der Haken an der Sache: Wegen möglicher Interferenzen in dieser Summe ist es denkbar, dass im klassischen Grenzfall eine Raumzeit herauskommt, deren Dimension von vier abweicht. Doch Entwarnung! Bei der dynamischen Triangulation ergaben die Berechnungen makroskopisch tatsächlich die gewohnten vier Dimensionen – drei für den Raum und eine für die Zeit. Dennoch erlebten die Forscher eine herbe Überraschung: Sobald sie sich mathematisch den kleinen Skalen näherten, zumal der Planck-Länge, wurde der Raum effektiv eindimensional.

Das klingt verwirrend. Doch das gleiche Ergebnis ergibt sich auch in einem anderen Zugang zur Quantengravitation, den die Erfinder »asymptotische Sicherheit« nannten. Er wurde in den 1970er Jahren vom US-Physiker Steven Weinberg (University of Texas in Austin) entworfen und im letzten Jahrzehnt hauptsächlich von Martin Reuter und seinen Mitarbeitern von der Universität Mainz ausgearbeitet. Nimmt man noch die Indizien aus der Schleifentheorie hinzu, so ergibt sich ein erstaunliches Bild der Raumstruktur im Mikrokosmos: Von den drei klassischen Raumdimensionen auf makroskopischer Ebene bleibt dann nur noch eine übrig.

Die erwähnten Vorgehensweisen gehen in der Regel von Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie aus. Die jeweilige Quantengravitation ist also zunächst einmal eine Quantentheorie des Gravitationsfelds. Weitere Felder und Materie kommen zwar auch vor, werden aber nicht grundlegend anders beschrieben als in den gängigen Quantentheorien. Insbesondere führen diese Zugänge, und das ist ihr großes Manko, noch nicht zu einer Vereinheitlichung aller Wechselwirkungen inklusive der Schwerkraft.

Eine grundsätzlich andere Sichtweise bietet die Stringtheorie (siehe SdW 12/2010, S. 34). Hier geht man nicht von den bekannten Wechselwirkungen aus. Die fundamentalen Freiheitsgrade sind eindimensionale Objekte, also Saiten (englisch: strings), deren Wechselwirkung durch eine Quantentheorie konsistent beschrieben wird. Altbekannte Kräfte wie Gravitation oder Elektromagnetismus folgen erst aus den Anregungen der Strings, gewissermaßen als Obertöne der elementaren Objekte. Das Obertonspektrum liefert eine große Vielfalt an Teilchen, wozu Gravitonen und Photonen, aber auch noch unbekannte Partikel zählen.

Es gibt einen weiteren Unterschied zu den bisher besprochenen Theorien der Quantengravitation. Während sich diese direkt in vier Raumzeitdimensionen formulieren lassen, benötigt die Stringtheorie der mathematischen Konsistenz halber sechs oder sieben zusätzliche Raumdimensionen; die Raumzeit wäre dann fundamental zehn- oder elfdimensional. Unter günstigen Umständen erwarten die Experimentatoren, dass sich am LHC in Genf Hinweise auf die Existenz dieser zusätzlichen Dimensionen ergeben. Es ist zwar spekulativer, doch zumindest denkbar, dass dort sogar winzige Schwarze Löcher entstehen und verdampfen könnten. Aber auch darauf gibt es bis jetzt keine Hinweise.

Die Stringtheorie bietet zumindest im Prinzip die Möglichkeit, eine vereinheitlichte Beschreibung aller Wechselwirkungen zu liefern. Sie dürfte dafür nur wenige freie Parameter enthalten, woraus sich dann alle wesentlichen Eigen-

schaften unserer Welt ergeben sollten (deshalb häufig auch »Weltformel« genannt). Leider wird sie diesem Anspruch bisher nicht gerecht, obwohl Forscher nun schon seit mehreren Jahrzehnten daran arbeiten. Die Theorie enthält drei dimensionsbehaftete Parameter: Zu Lichtgeschwindigkeit und Wirkungsquantum gesellt sich noch die fundamentale Stringlänge. Alle anderen Größen (etwa die Massenwerte der beobachteten Teilchen), ja selbst die planckschen Einheiten, sollten sich daraus berechnen lassen.

Dass dies bisher nicht funktioniert, liegt vor allem an den zusätzlichen sechs oder sieben Raumdimensionen. Die Möglichkeiten, von der höherdimensionalen Welt zu den beobachteten und uns vertrauten vier Raumzeitdimensionen zu gelangen, sind ziemlich willkürlich und derart vielgestaltig, dass jede Vorhersagekraft zu entschwinden scheint. Stringforscher haben abgeschätzt, dass es mindestens 10^{500} Kandidaten für unser Universum gibt, eine Zahl, die unvorstellbar viel größer ist als selbst die Gesamtzahl der Protonen im sichtbaren Universum von 10^{80}.

Der Urknall als Quantenzustand

Obwohl ursprünglich nur auf Strings basierend, hat sich gezeigt, dass die Stringtheorie auch höherdimensionale Objekte postuliert, für die sich der Begriff »Branen« eingebürgert hat (inspiriert vom Beispiel der Membran). Vielleicht etwas unerwartet, bieten gerade die Branen die ersehnten mikroskopischen Freiheitsgrade für die Berechnung der Entropie Schwarzer Löcher. In speziellen Fällen führt das Abzählen dieser Mikrozustände tatsächlich zur gewünschten Formel von Bekenstein und Hawking. Das betrifft allerdings nur gewisse exotische Schwarze Löcher, wie sie von der Stringtheorie ebenfalls vorausgesagt werden. Die im Weltall beobachteten Schwarzen Löcher, darunter das im Zentrum unserer Milchstraße, zählen nicht dazu.

Einen weiteren Prüfstein für jede Quantentheorie und ihren Sonderzweig, die Quantenkosmologie, liefert die kosmische Hintergrundstrahlung – ein Überbleibsel des heißen, frühen Universums. Sie hat sich etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall von der Materie gelöst und breitet sich seither ungehindert im All aus. Dabei hat sie sich bis auf etwa drei Kelvin abgekühlt. Die kosmische Hintergrundstrahlung ist annähernd isotrop, das heißt, sie besitzt in jeder Richtung dieselbe Temperatur. Es gibt nur kleine Unregelmäßigkeiten (Anisotropien) von der Größenordnung hunderttausendstel Kelvin. Sie entsprechen Dichtefluktuationen zur Zeit der Strahlungsfreisetzung und bildeten nach allgemeiner Auffassung die Keime heutiger Galaxien und ihrer Haufen.

Was hat das mit Quantengravitation zu tun? Wenn sie tatsächlich gültig ist, sollte sie auch für das Universum als Ganzes gelten. Dort ist aber die Schwerkraft die dominierende Wechselwirkung. Kosmologen benötigen also eine Theorie der Quantengravitation, um Quantenkosmologie zu betreiben. Sowohl Geometrodynamik als auch Schleifen- und Stringtheorie lassen sich auf das gesamte Universum anwenden. Idealerweise könnten sich daraus Vorhersagen für die Anisotropien der Hintergrundstrahlung ergeben, die von den Vorhersagen ohne Quantengravitation abweichen. Dies betrifft vor allem die Strukturen auf großen Skalen. Die vorhergesagten Abweichungen sind naturgemäß winzig klein, und ihr Nachweis stellt eine große Herausforderung für die Beobachter dar. Deren Hoffnung ruht derzeit auf dem Satelliten Planck. Der Trabant, den die Europäische Weltraumbehörde ESA im Mai 2009 startete und der im Januar 2012 seine Messungen abschloss, hatte die Aufgabe, die Hintergrundstrahlung mit bisher unerreichter Genauigkeit zu erfassen. Die Auswertungen werden noch bis 2013 dauern. Ob sie für die Theorie einen Durchbruch bringen werden, bleibt abzuwarten.

Die Quantenkosmologie dient freilich nicht in erster Linie dazu, kleine Effekte im Anisotropiespektrum aufzuspüren. Sie soll vor allem die Anfangsbedingungen des Universums und seine großräumige Struktur erklären. Wir haben ja gesehen, dass Einsteins Theorie bei der Beschreibung des kosmischen Anfangs notgedrungen zu einer Singularität führt, sie jenen Anfang also gar nicht selbst erklären kann. Die Singularität bedeutet zum Zeitpunkt null einen Zustand unendlich großer raumzeitlichen Krümmung. Gelingt es der Quantengravitation, diese Probleme zu vermeiden? Die Antwort ist derzeit ein vorsichtiges Ja. Das heißt, es gibt zumindest einfache Modelle, in denen das bereits gelingt.

Welche der hier diskutierten Zugänge zur Quantengravitation der richtige ist, wissen die Forscher noch nicht. Sie wissen nicht einmal, ob der richtige schon darunter ist – ja ob es einen solchen überhaupt gibt. Klar ist aber, dass eine Quantengravitation zu einem tieferen Verständnis von Zeit und Universum führt – mit aufregenden Konsequenzen.

DER AUTOR

Claus Kiefer studierte Physik und Astronomie an den Universitäten Heidelberg und Wien und promovierte 1988 in Heidelberg über den Begriff der inneren Zeit in der kanonischen Quantentheorie der Gravitation. Nach Aufenthalten an den Universitäten Heidelberg, Zürich und Freiburg, wo er 1995 habilitierte, wurde er 2001 Professor für theoretische Physik an der Universität zu Köln. Seine Arbeitsgebiete betreffen Quantengravitation, Kosmologie, Schwarze Löcher und Grundlagen der Quantentheorie.

QUELLEN

Kiefer, C.: Der Quantenkosmos. Fischer, Frankfurt am Main 2008
Reise durch das Quantenuniversum. Spektrum der Wissenschaft, Dossier 2/2010
Zeh, H.-D.: Feynman's Interpretation of Quantum Theory. Online unter **http://arxiv.org/abs/arXiv:0804.3348**

WEBLINKS

www.thp.uni-koeln.de/gravitation
Informationen zum Autor und seiner Arbeitsgruppe

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1142715**

Licht im Schatten

Der Strahlenkranz eines Axicons scheint den Schatten der eigenen Hand ungehindert durchdringen zu können.

Aber vor allem ist er sichtbar,
indem er undurchsichtig ist.
Hans Blumenberg (1920–1996)

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Undurchsichtige Gegenstände lassen kein Licht passieren – daran gibt es nichts zu rütteln. Auch durch den Schatten eines solchen Gegenstands wird kein Licht treten. Ein Blick auf das Foto (rechts) wirft aber Zweifel auf. Hier scheint der Schatten einer Hand eben doch strahlendes Licht hindurchzulassen. Die Frage lautet: Wie kommt es dorthin?

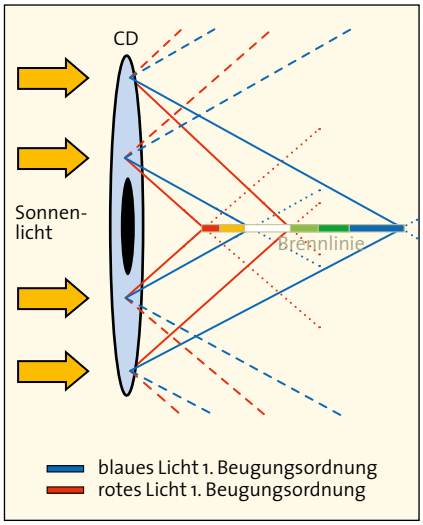
Das Foto entstand, als wir das Beugungsverhalten einer Musik-CD untersuchten. Ihre metallische Beschichtung hatten wir zuvor entfernt. Dann benutzten wir die feinen Spurrillen als Reflexionsgitter, mit dem wir das durch ein Fenster in den Raum fallende Sonnenlicht an eine weiße Wand projizierten (siehe »Verwirrende Beugung«, SdW 5/2011, S. 54). Doch bei der Suche nach einem geeigneten Reflexionswinkel drehte der Experimentator die CD-Scheibe versehentlich ein Stück zu weit. Das Licht fiel daher plötzlich durch die CD hindurch, die Scheibe war damit unversehens zu einem Transmissionsgitter geworden. Sie beugte die Strahlen und brachte sie auf der Wand zu farbiger Interferenz. Allerdings landete Licht eben auch dort, wo man es nicht erwartete – nämlich mitten im Schatten der Hand.

Die blauen Lichtspeichen des Strahlenkranzes weisen ungefähr in Richtung der Fingerzwischenräume. Dies erlaubt die Vermutung, das Licht könnte von jenen Teilen der CD stammen, die nicht von Fingern abgedeckt sind, und von dort zur Mitte hin gelenkt werden. Diese Hypothese lässt sich leicht überprüfen. Ein solches System müsste ja eine Brennweite besitzen, also einen Abstand zwischen CD und Wand, bei der der Brennpunkt genau auf der Wand liegt und das Zentrum des Strahlenkranzes darum besonders scharf erscheint.

Variieren wir also den Abstand zwischen CD und Projektionswand. Auf einen Brennpunkt stoßen wir dabei erstaunlicherweise nicht, sondern vielmehr auf etwas, was eher einer senkrecht zur CD verlaufenden Brennlinie ähnelt. Offenbar können wir nämlich den Abstand zur Wand um bis zu 15 Zentimeter verändern, ohne dass sich die Schärfe des Bilds verändert. Das wäre bei Abbildungen mit Linsen nicht zu erreichen. Auch strukturiertere Objekte lassen sich mit großer Tiefenschärfe abbilden – Hauptsache, sie leuchten von selbst, wie etwa eine Lichterkette.

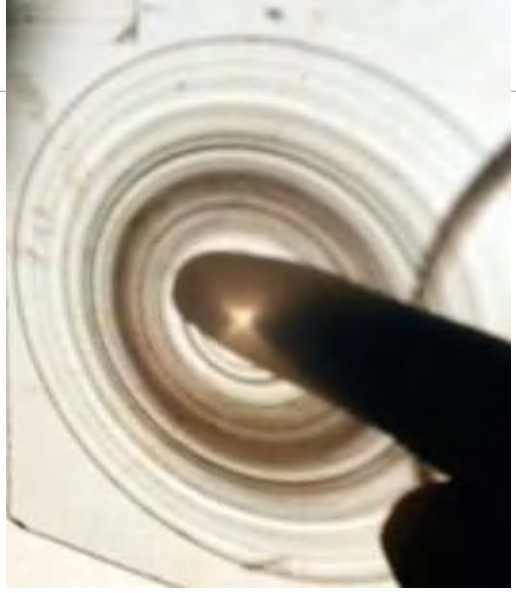
Und noch etwas fällt auf. Dass die CD teilweise verdeckt ist, verschlechtert die Abbildung nicht etwa, sondern lässt sie sogar hervortreten. Denn könnte Licht direkt durch das Loch in der Mitte der CD gelangen, würde es das Bild schlicht überstrahlen. Beim Experimentieren empfiehlt es sich daher, das rillenfreie »inaktive« Zentrum der CD kreisförmig abzudecken. Auf diese Weise kann man übrigens doch noch einen Brennpunkt finden. Deckt man nämlich, von innen beginnend, mehr und mehr Spuren der CD ab, so verkürzt sich die Brennlinie entsprechend. Dies kann man so lange weitertreiben, bis nur noch wenige Spuren zur Abbildung beitragen. Dann ist die Brennlinie zum Brennpunkt geschrumpft.

Wie kommt nun der Strahlenkranz zu Stande? Ursache ist die Beugung des Lichts an der spiralförmig verlaufenden Spur. Diese bildet näherungsweise ein System aus Ringen mit nahezu identischen Abständen. Aus Symmetriegründen wird das Licht einerseits zur optischen Achse hin (siehe Grafik links, durchgezogene Linien) und andererseits von der optischen Achse weg gebeugt (gestrichelte Linien). Daher lässt sich sagen, dass die CD das Licht sowohl fokussiert als auch defokussiert. Zu dem von uns untersuchten Phänomen trägt nur das Licht bei, dessen Weg mit durchgezogenen Linien markiert ist. Überdies ist hier nur Licht der 1. Beugungsordnung dargestellt, denn allein dieses liefert Beiträge zur Brennlinie.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT NACH H.-J. SCHLICHTING

Um ein Axicon zu erzeugen, kann man Sonnenlicht auf eine CD fallen lassen, deren metallische Beschichtung entfernt wurde. Die CD beugt das Licht so, dass es sich in einer Brennlinie überlagert. Definiert ist ein Axicon als optisches Element (die CD), das einen Punkt (die punktförmig gedachte Sonne) in ein Liniensegment längst der optischen Achse verwandelt (die Brennlinie). Lichtstrahlen sind als blaue und rote Linien symbolisiert. Gestrichelte Linien tragen nicht zu dem Phänomen bei. Strahlen, die gepunktet dargestellt sind, lassen einen Lichtkranz um den Schnittpunkt der Brennlinie mit der Wand entstehen.



FOTOS: H.-J. SCHLICHTING

Der Schatten einer Hand, die eine CD umfasst, scheint von einem Strahlenkranz durchleuchtet zu werden (links). Ursache ist ein Axicon. Das ungewöhnliche Beugungsphänomen entsteht nur, wenn die metallische Beschichtung der CD entfernt wurde, so dass ihre Spurrillen als Transmissionsgitter dienen können.

Neben der Lichtbeugung kann auch der Effekt der Lichtbrechung helfen, ein Axicon zu erzeugen. Im Fall des Fotos rechts wurden Rillen in ein Glas geritzt. Auch hier scheint der Finger von Licht durchstrahlt zu werden. Allerdings kommt es hier nicht zu einer Aufspaltung der Spektralfarben wie im linken Foto.

Die Brennlinien höherer Ordnung würden eine weitere winzige Brennlinie zur CD bilden. Diese ist aber zu lichtschwach, um ohne Weiteres erkannt zu werden.

Im weißen Licht sind alle Spektralfarben gemischt, doch zur Brennlinie trägt jede Farbe einzeln bei. In der Grafik ist zur besseren Anschauung darum rotes Licht – also elektromagnetische Wellen am langwelligen Ende des sichtbaren Spektrums – als rote Linie dargestellt. Dieses wird unter dem größten Winkel gebeugt und kennzeichnet den Beginn der Brennlinie; blauviolettes Licht dagegen unter dem kleinsten Winkel, es markiert das Ende.

Dies erklärt auch folgende Beobachtung: Hält man die Scheibe dicht vor die Wand, sieht man dort, wo sich Brennlinie und Wand schneiden, einen roten Punkt. Vergrößert man den Abstand, wechselt dessen Farbe über Gelb nach Weiß, Grün und schließlich Blau (siehe Grafik links). Dabei tritt Weiß erst dann auf, wenn auch noch das blauviolette Licht aus den innersten Rillen hinzutritt.

Die Brennlinie erstreckt sich nicht isoliert im Raum, sondern ist von farbigem Licht viel geringerer Intensität umgeben. Denn nachdem das gebeugte Licht 1. Ordnung sich in der Brennlinie auf der optischen Achse gekreuzt hat, läuft es wieder auseinander (Grafik links, gepunktete Linien) und erreicht ebenfalls die Wand.

Neu ist das hier vorgestellte Phänomen allerdings keineswegs. Vielmehr handelt es sich um ein so genanntes Axicon, das wohl erstmals von John H. McLeod 1954 im »Journal of the Optical Society of America« beschrieben wurde. Nach McLeods Definition ist ein Axicon ein optisches Element, das einen Punkt – etwa die Sonne als näherungsweise punktförmige Lichtquelle – in ein Liniensegment längs der optischen Achse verwandelt. Genau das ist hier zu beobachten: Der zentrale weiße Fleck im Strahlenkranz – der Schnittpunkt der an dieser Stelle zufällig weißen Brennlinie mit der Wand – ist das von farbigem Streulicht umgebene Abbild der Lichtquelle. Es wird aber über einen auffallend großen Bereich hinweg scharf abgebildet. Dem Vorteil der enormen Tiefenschärfe steht entgegen, dass die Qualität der Abbildung geringer ist als bei konventionellen, linsenbasierten Methoden.

Lässt sich ein Axicon vielleicht auch mit Hilfe von Lichtbrechung an Stelle von -beugung erzeugen? Das geht tatsächlich. Auf die Farbaufspaltung des Lichts muss man dabei allerdings verzichten. Man bringe Schmirgelpapier mit Hilfe einer Bohrmaschine zum Rotieren und ritze damit Rillen in eine alte Glasscheibe. Das Resultat ist zwar nicht besonders gleichmäßig (siehe Foto oben rechts), erfüllt seinen Zweck aber gut: Lässt man nämlich Sonnenlicht durch das Glas fallen und hält dahinter einen Finger in den Strahlengang, wird auch hier der Schatten des Fingers durch das Licht des Axicons aufgehellt.

Heute haben Axicon-»Linsen« übrigens längst Anwendung in Forschung und Technik gefunden. Dabei bleibt nicht einmal die Faszination auf der Strecke: Spezielle Anordnungen schaffen es sogar, Laserstrahlen in Lichtringe zu verwandeln. ~

DER AUTOR

H. Joachim Schlichting war bis 2011 Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. 2008 erhielt er für seine didaktischen Konzepte den Pohl-Preis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.

QUELLE

McLeod, J.: The Axicon: A New Type of Optical Element. In: Journal of the Optical Society of America 44, S. 592–597, 1954

KLASSISCHE MECHANIK

Die Ente muss raus!

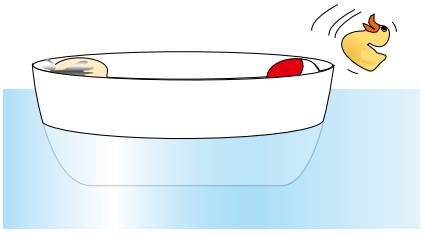
Wie ändert sich der Wasserspiegel eines Sees, wenn aus einer darauf schwimmenden Wanne Dinge hineingeworfen werden?

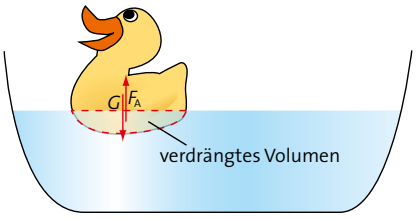
VON THOMAS RUBITZKO

Vicco von Bülow, der Altmeister des deutschen Humors, besser bekannt als Loriot, ist am 22. August letzten Jahres gestorben. Seine Sketche aber werden ihn überleben, darunter Klassiker wie »Die Nudel« und »Herren im Bad« – Anlass genug, den letzteren ein bisschen anders zu erzählen: physikalischer.

»Die Ente bleibt draußen!«, beharrt Herr Müller-Lüdenscheidt in seinem Streitgespräch mit Herrn Dr. Klöbner. Was den Herren bei ihrer Auseinandersetzung entgangen ist: Auf Grund eines Rohrbruchs ist das Badezimmer zur Hälfte voll Wasser gelaufen, das seinerseits die Wanne samt den Insassen aus der Verankerung gehoben hat. Jetzt treiben sie in ihrer Wanne auf einem künstlichen See und hätten eigentlich allen Anlass, darüber nachzudenken, wie sie ihrer misslichen Lage entrinnen könnten.

Aber unsere Prinzipienreiter denken überhaupt nicht daran. Ihnen ist das Wichtigste die Quietscheente, die Herr Dr. Klöbner gegen Herrn Müller-Lüdenscheidts erbitterten Protest gerade noch rechtzeitig vor dem Abheben ins Boot geholt hat. Da die Herren relativ schwer sind, schwappt das Wasser bereits bedrohlich am Wannenrand. Würde sich die Wanne vielleicht ein Stück aus dem Wasser heben, wenn die Ente über Bord geworfen würde? Und würde sich dadurch der Wasserspiegel im Badezimmer – nach oben oder unten – verändern?





Die Auftriebskraft F_A hat stets den gleichen Betrag wie die Gewichtskraft G der verdrängten Flüssigkeit.

»Herr Dr. Klöbner, die Ente muss raus!«

»Gemach, gemach, Herr Müller-Lüdenscheidt. Lassen Sie uns alles zuerst theoretisch betrachten. Ich entsinne mich an einen Herrn, der in der Wanne saß, dadurch Badewasser verdrängte, worauf er plötzlich eine Erleuchtung bekam, heraussprang und …«

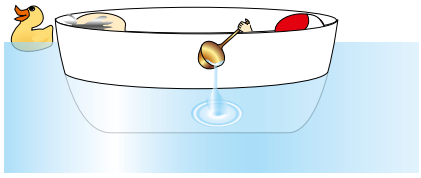
»Das ist eine hervorragende Idee, Herr Dr. Klöbner. Selbstverständlich steht es Ihnen frei, die Wanne zu verlassen. Es ist ja meine Wanne.«

»Nein, nein, es war genau umgekehrt. Er saß in der wassergefüllten Wanne und sprang ins Trockene. Und dann rannte er auf die Straße und rief ›Heureka!‹, weil ihm gerade die Lösung des Problems gekommen war.«

Nach dem Prinzip des Archimedes hat die Auftriebskraft, die auf einen Körper in einer Flüssigkeit wirkt, den gleichen Betrag wie die Gewichtskraft, die das Flüssigkeitsvolumen erfahren würde, welches der Körper unterhalb der Flüssigkeitsoberfläche einnimmt (Bild oben). Da Schwimmen ein Zustand der Ruhe ist, muss ein Kräftegleichgewicht vorliegen. Der Körper taucht also so weit ein, dass die nach oben wirkende Auftriebskraft genauso groß ist wie die nach unten auf den Körper wirkende Gewichtskraft.

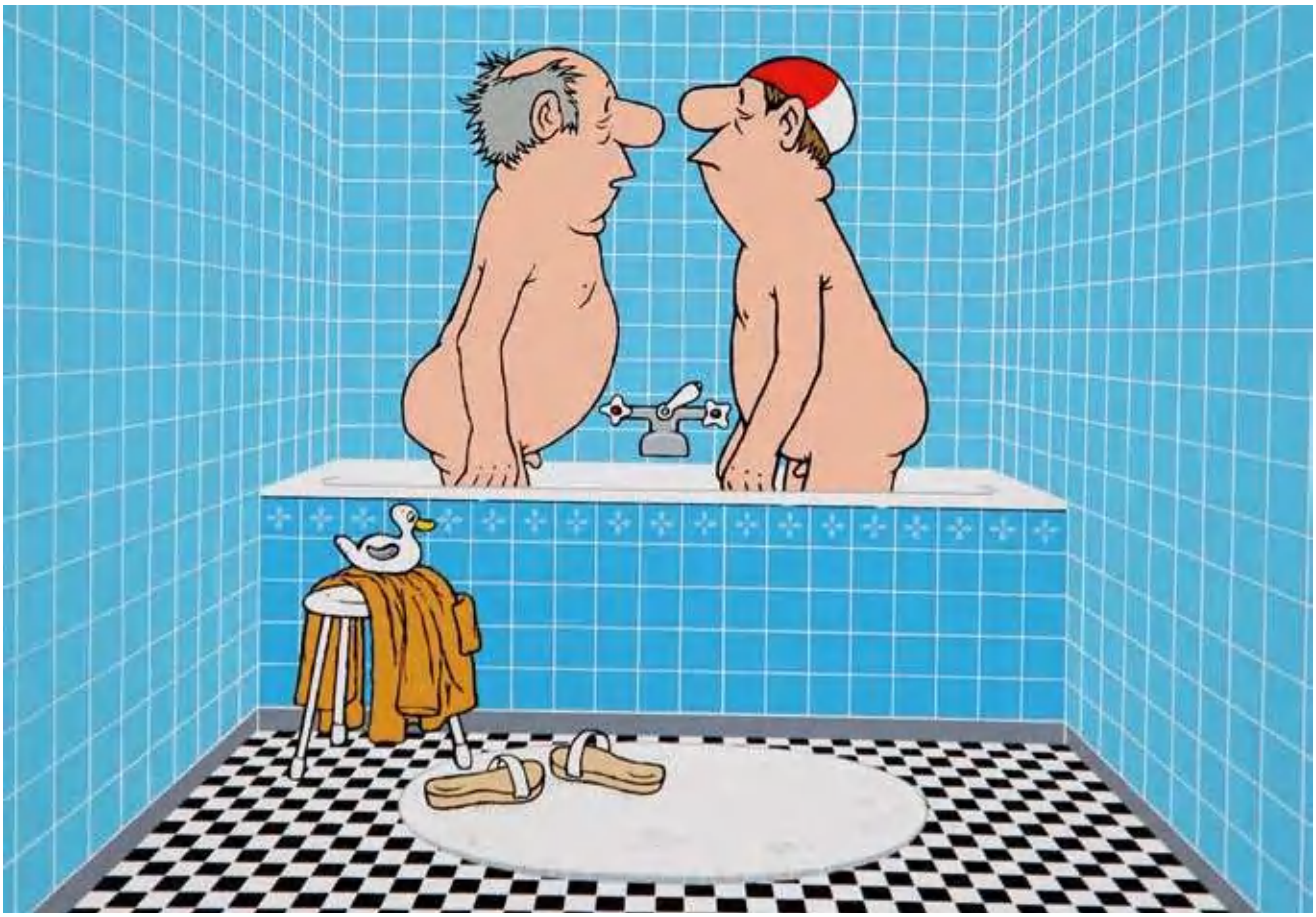
Sitzt die Ente in der Wanne, addiert sich ihr Gewicht zu dem der Wanne samt Inhalt. Nach Archimedes verdrängt sie dabei mittels Wanne ein Flüssigkeitsvolumen, das genauso viel wiegt wie sie selbst. Schwimmt sie dagegen direkt auf dem See, verdrängt sie – genauso viel Wasser. Am Wasserspiegel des Sees ändert sich durch ihren Rauswurf nichts, abgesehen von einem vorübergehenden Absinken während der Flugphase. Dies gilt für alle schwimmenden Festkörper wie beispielsweise auch für ein Stück Fichtenholz (Bild *a*, S. 48).

»Ein Stück Holz? Wie langweilig, dann könnten Sie gleich Wasser ins Wasser kippen …«



Das ist in der gegenwärtigen Situation eine hervorragende Idee, denn das in die Wanne geschwappte Wasser steht den Herren – nun, nicht gerade bis zum Hals, aber doch unkomfortabel bis zur Oberkante des großen Zehs. Man schöpft einträchtig, die Wanne hebt sich merklich, aber der Wasserspiegel draußen bleibt unverändert (*b*). Zwar verdrängt die Wanne nun weniger Volumen, doch gleicht das zusätzliche, hinausgeschöpfte Wasser das genau aus. Wasser schwebt in Wasser; auch hier haben Auftriebskraft und Gewichtskraft den gleichen Betrag.

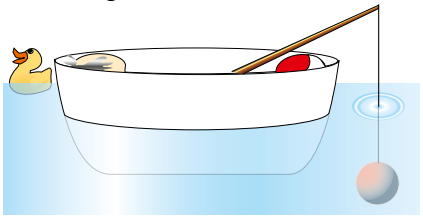
Was könnten die Herren über Bord werfen, um die Flutung des Badezimmers merklich zu mindern – gesetzt den Fall, sie hätten sich vorher entsprechend ausgerüstet, was die Originalgeschichte an Absurdität noch übertreffen würde? Unterstellen wir einfach,



PICTURE ALLIANCE / EVENTPRESS RADKE; ALLE ÜBRIGEN ABBILDUNGEN DES ARTIKELS: THOMAS RUBITZKO

Über der Auseinandersetzung um die Sitzrechte in der Badewanne und die Besitzrechte an der Quietscheente vernachlässigen die Herren Dr. Klöbner (links) und Müller-Lüdenscheidt (rechts) die wesentlich bedeutsameren physikalischen Fragen.

Herr Dr. Klöbner und Herr Müller-Lüdenscheidt seien bereit gewesen, der physikalischen Erkenntnis zuliebe die merkwürdigsten Dinge an Bord zu nehmen: Eisenkugeln, Eiswürfel sowie größere Mengen an Salz, Öl und Alkohol.



Um den Wasserspiegel deutlich zu senken, muss es schon etwas richtig Schweres sein – etwas richtig Dichtes, um genau zu sein: Eisenkugeln zum Beispiel (C). Die sinken im Wasser, denn der Auftrieb, den eine Eisenkugel dort erfährt, ist geringer als ihr Gewicht. Am Boden des Sees verdrängt sie genau ihr Volumen; das ist kleiner als das Volumen, welches sie zuvor mittels Wanne schwimmend verdrängt hat. Also sinkt der Wasserstand.

Eine Eisenkugel mit einem Volumen von einem Liter verdrängt an Bord mittels Wanne etwa 7,9 Liter Wasser (siehe Tabelle rechts), im Wasser dagegen nur ihr eigenes Volumen. Das Füllvolumen des Sees verringert sich also um immerhin fast sieben Liter, wenn solch eine Kugel über Bord geht.

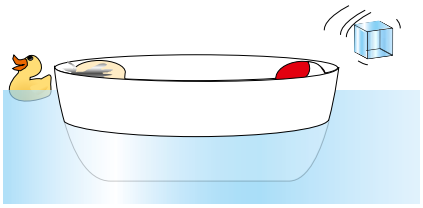
Es kommt übrigens nicht darauf an, ob die Eisenkugel sich innerhalb oder außerhalb der Wanne befindet, sondern nur, ob sie eine Kraft auf dieselbe ausübt. Nehmen wir an, einer der Herren hängt die Eisenkugel mittels einer Angel nach draußen. Damit sie nicht herunterfällt, muss er eine aufwärtsgerichtete Kraft aufwenden, die gleich dem Gewicht der Kugel ist. Dem entspricht – es herrscht wieder Kräftegleichgewicht – eine gleich große abwärtsgerichtete Kraft, die der Angler mangels festen Standpunkts auf den Boden der Wanne ausübt.

Bis jetzt sind Tiefgang der Wanne und Wasserspiegel noch unverändert. Lässt der Angler die Kugel nun ins Wasser, ohne sie auf dem Seeboden abzusetzen, so verspürt er eine gewisse Erleichterung, und das Boot steigt, aber der Wasserspiegel bleibt unverändert.

Dichtetabelle

Was über Bord geht	mittlere Dichte in Kilogramm pro Liter
Ente	≈ 0,1
Fichtenholz	≈ 0,5
Kochsalz	2,2
Wasser	1,0
Alkohol	0,79
Eisen, zum Beispiel Blechbadewanne	7,9
Dr. Klöbner inklusive Schwimmflügel	≈ 0,9
Olivenöl	0,91
Eis	≈ 0,9

Denn die Kugel verdrängt jetzt einen Liter Wasser im See; gleichzeitig verringert sich dank Auftrieb die Kraft, mit der sie mittels Angler das Boot abwärtszieht, um das Gewicht ebendieses Liters Wasser. Erst wenn die Kugel nicht mehr an der Angelschnur zieht, weil diese zum Beispiel durchgeschnitten oder lang genug abgerollt ist, geht es nochmals aufwärts mit dem Boot – und erstmals abwärts mit dem Wasserspiegel.



Was geschieht, wenn die Herren einen Eiswürfel über Bord werfen? Da die Dichte von Eis geringer ist als die von Wasser, verhält es sich zunächst so wie mit einer Quietscheente: Der Wasserspiegel ändert sich nicht. Und wenn er schmilzt? Immer noch nicht, obwohl der feste Würfel ein Stück aus dem Wasser schaut, was der geschmolzene offensichtlich nicht tut.

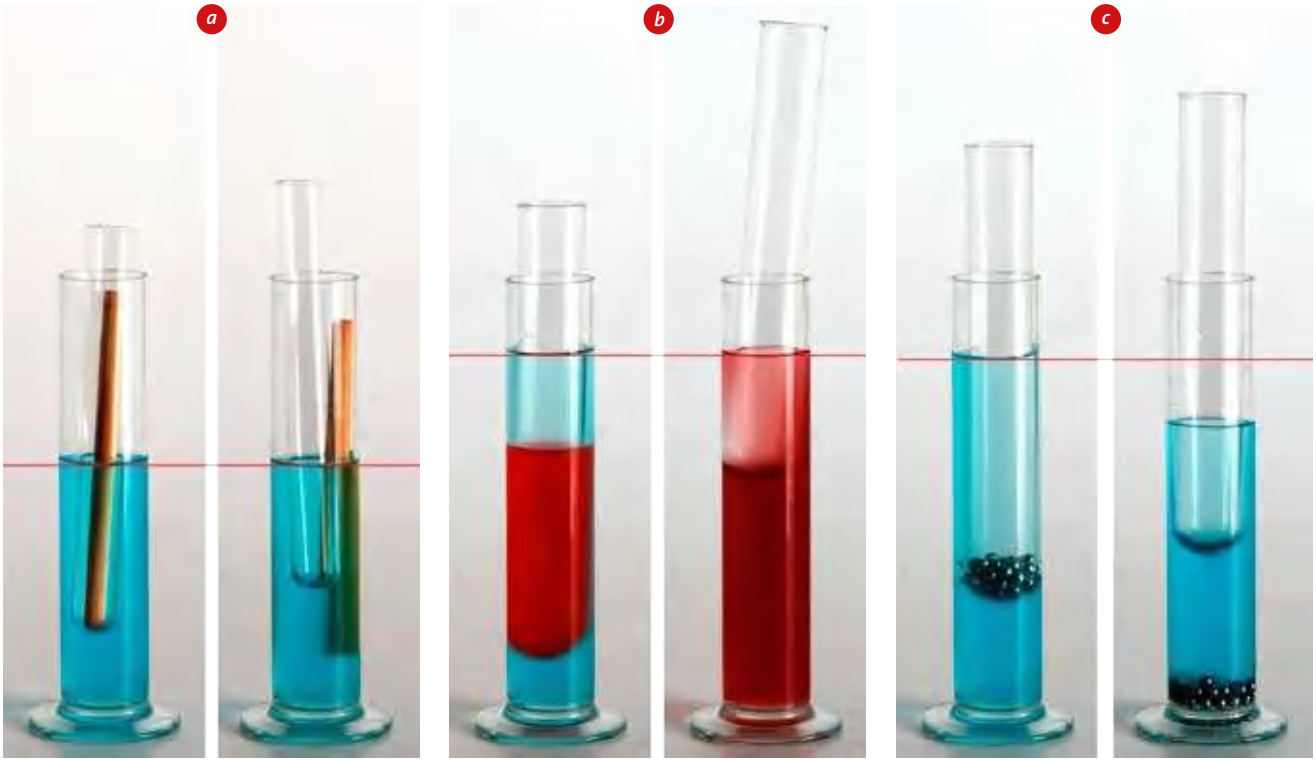
Die Wassermenge, die der Eiswürfel unterhalb der Wasserlinie verdrängt, hat nämlich das gleiche Gewicht wie der ganze Würfel. Dieses ändert sich nicht durch Schmelzen. Wenn also das feste Wasser flüssig wird, verliert es genau so viel Volumen, wie zuvor über die Wasseroberfläche ragte.

Wie war das mit dem Anstieg des Meeresspiegels, weil infolge des Klimawandels die Eisberge schmelzen? Die Eisberge, die ohnehin schon im Meer schwimmen, sind nicht das Problem, wie wir soeben gesehen haben. Aber es gibt große Mengen Eis auf dem Festland; dessen Abschmelzen ist es, das wir zu fürchten haben.

Zurück vom Weltklima zu den Herren in der Wanne! Wir haben vernachlässigt, dass das Eis die Temperatur des Sees absenkt. Durch den Kühlungseffekt zieht sich das Wasser zusammen, und der Wasserspiegel sinkt, allerdings sehr geringfügig. Dabei haben wir unterstellt, dass die Temperatur des Sees vorher wie nachher über vier Grad Celsius liegt – was wir im Interesse von Herrn Dr. Klöbner und Herrn Müller-Lüdenscheidt hoffen wollen.

Was ändert sich, wenn man einen Eiswürfel ins Wasser wirft, der einen mit Luft und einer Eisenkugel gefüllten Hohlraum enthält? Nehmen wir an, dass er zunächst schwimmt, dass also Eis und Luft mit ihrer geringen Dichte die große Dichte des Eisens kompensieren. Solange das Eis nicht geschmolzen ist, ändert sich der Wasserspiegel nicht. Schmilzt das Eis, so entweicht die Luft, und die Eisenkugel sinkt.

Einzeln betrachtet verdrängt das geschmolzene Eis das gleiche Volumen wie vorher, die Luft gar keins und die sinkende Kugel viel weniger als zuvor. Insgesamt sinkt der Wasserstand deutlich, und zwar umso mehr, je mehr Eisen und damit auch Luft sich im Eiswürfel befanden. Ein allein mit Luft gefüllter Eiswürfel verändert den Wasserspiegel übrigens gar nicht.



Wirft man einen (zum Beispiel hölzernen) Gegenstand, dessen Dichte geringer ist als die des Wassers, aus der Wanne (Reagenzglas) in den See (großes Becherglas), ändert sich dadurch der Wasserspiegel im See nicht. Allerdings ragt die Wanne höher aus der Wasseroberfläche heraus als zuvor (*a*). Ob das (rot gefärbte) Wasser im Reagenzglas ist oder gemeinsam mit dem umgebenden (blau gefärbten) Wasser im Becherglas, macht für den Wasserspiegel im letzteren keinen Unterschied (*b*). Im Reagenzglas verdrän-

Das archimedische Prinzip am Beispiel der Badewanne

Wie beeinflussen die geometrischen Verhältnisse von Badewanne und See die Veränderung des Wasserspiegels? Wenn das Einwerfen eines Kilogramms Eisen den Wasserspiegel um einen Millimeter absinken lässt, sind es bei zwei Kilogramm dann zwei Millimeter? Hier führen einfache mathematische Beschreibungen rasch zum Ziel.

Bezeichnen wir mit V das Gesamtvolumen unterhalb des Wasserspiegels (See und eingetauchter Teil der Wanne). Es ergibt sich aus dem Wasservolumen V_{Wasser} plus dem eingetauchten Volumen der Wanne V_{Wanne}: $V = V_{\text{Wasser}} + V_{\text{Wanne}}$.

Werfen wir nun einen Festkörper der Masse m aus der Wanne heraus, so vermindert sich das eingetauchte Wannenvolumen nach dem Prinzip des Archimedes um das Volumen des Wassers, welches die gleiche Masse hat wie der geworfene Gegenstand, also um m/ρ_{Wasser}, wobei ρ_{Wasser} die Dichte von Wasser ist.

Nach dem Auftreffen des Wurfobjekts auf dem See zählen wir zum Volumen V_{Wasser} auch das, was der Körper zum Wasservolumen beiträgt, also $m/\rho_{\text{Körper}}$, wenn er absinkt, und m/ρ_{Wasser} (wieder archimedisches Prinzip), wenn er schwimmt. Im letzteren Fall ändert sich der Wasserspiegel überhaupt nicht. Für den abgesunkenen Körper ergibt sich

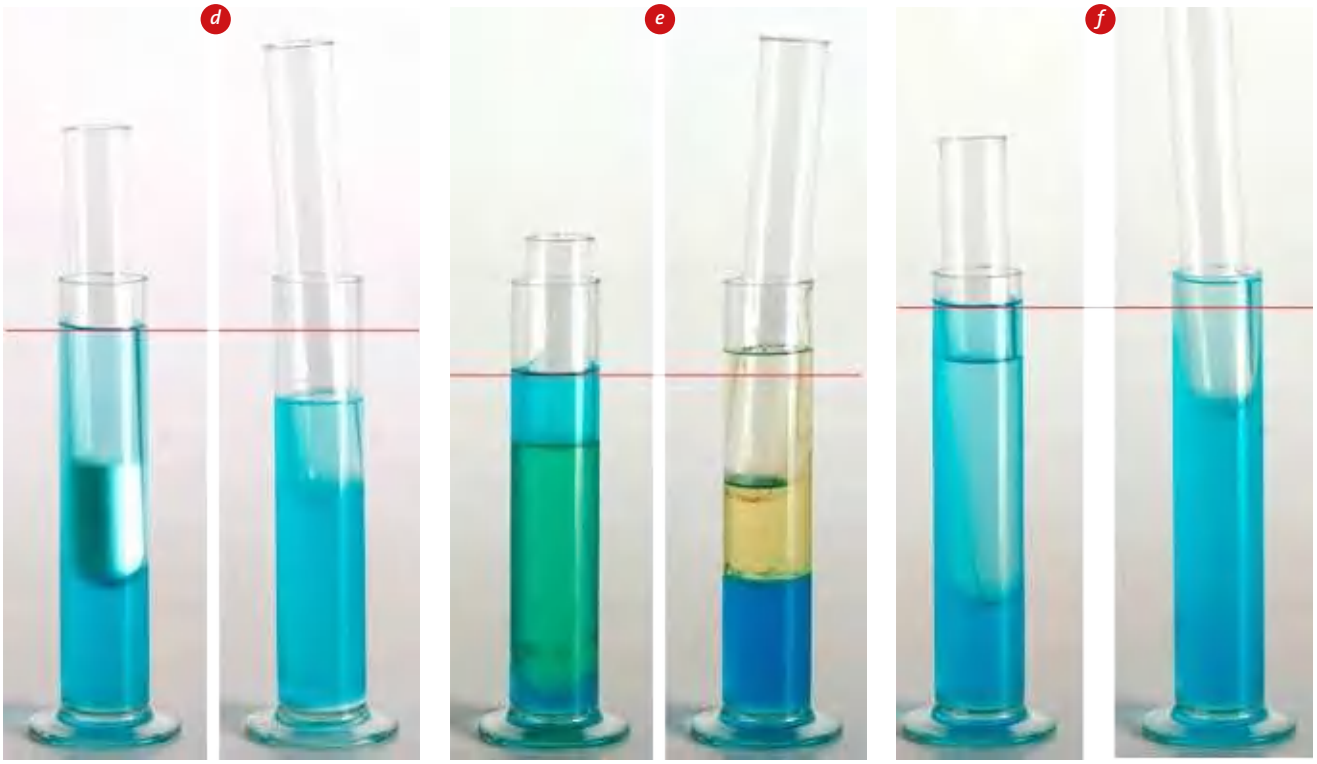
$$V = V_{\text{Wanne}} - m/\rho_{\text{Wasser}} + V_{\text{Wasser}} + m/\rho_{\text{Körper}} .$$

Was sagt uns das über die Höhe h des Wasserspiegels über Grund? Denken wir zunächst an einen See mit senkrechten Wänden (das wassergefüllte Badezimmer) und Grundfläche A. Dann gilt $V = Ah$ und damit

$$h = \frac{V_{\text{Wanne}}}{A} - \frac{m}{A\rho_{\text{Wasser}}} + \frac{V_{\text{Wasser}}}{A} + \frac{m}{A\rho_{\text{Körper}}}$$
$$= \frac{m}{A}\left(\frac{1}{\rho_{\text{Körper}}} - \frac{1}{\rho_{\text{Wasser}}}\right) + \frac{1}{A}(V_{\text{Wanne}} + V_{\text{Wasser}}) .$$

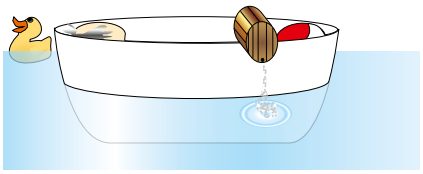
Die Änderung des Wasserspiegels ist also proportional zur eingeworfenen Masse – unabhängig von der Form der Wanne. Diese Linearität geht verloren, wenn, wie bei einem gewöhnlichen See, die Wasseroberfläche A von der Höhe h abhängig ist. Dann nämlich ist V das Integral über A von 0 bis h.

Bei einer Ein-Kilogramm-Eisenkugel würde der Wasserspiegel in einem Badezimmer mit einer Grundfläche von sieben Quadratmeter immerhin um 0,1 Millimeter absinken. Im Bodensee mit seiner Fläche von über 500 Quadratkilometern würde der Unterschied gerade noch fünf Tausendstel eines Atomdurchmessers ausmachen.



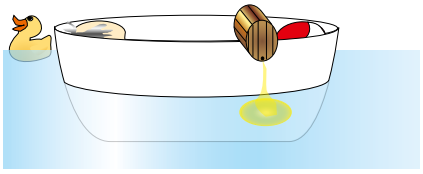
gen die Eisenkugeln so viel Wasser, wie ihrem Gewicht entspricht, im Wasser selbst nur so viel, wie ihrem Volumen entspricht; das ist deutlich weniger (c). Bei Salz an Stelle von Eisen kommt hinzu, dass die Dichte des Wassers durch den Salzgehalt zunimmt (d).

Gießen die Insassen der Wanne genügend Öl auf die Wogen, so schwimmen sie möglicherweise hinterher nur noch im Öl (e). Alkohol (farblos), aus der Wanne ins Wasser (blau gefärbt) gegossen, lässt den Wasserspiegel steigen wie bei Öl (f).



Im Gegensatz zu einer Eisenkugel löst sich Salz im Wasser. Es verdrängt dann nicht sein gesamtes Volumen, sondern etwas weniger. Damit sinkt der Wasserspiegel noch mehr als bei einem nichtlöslichen Feststoff gleicher Dichte.

Ein weiterer Effekt kommt hinzu: Da die Dichte der Flüssigkeit – jetzt eine Salzlösung – angestiegen ist, muss die Wanne weniger davon verdrängen, um ihre Gewichtskraft mit dem Auftrieb auszugleichen. Das heißt, der Wasserspiegel fällt noch zusätzlich (*d*).



Kippen die beiden Herren Öl über Bord, überschichtet dieses das Wasser. Damit gilt es zwei Flüssigkeitsspiegel zu beobachten, nämlich die Oberfläche des Wassers und die des Öls.

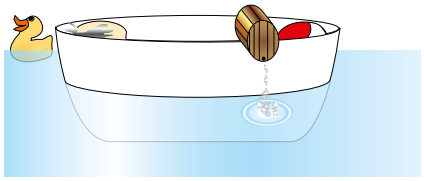
Betrachten wir zuerst die Grenzfläche zwischen Wasser und Öl. Da die Wanne nun weniger Flüssigkeit verdrängt als zuvor, taucht sie weniger tief ins Wasser ein, und der Wasserspiegel fällt. Außerdem wird ein Teil des benötigten Auftriebs durch das Öl übernommen, was zu einem weiteren Absinken des Wasserspiegels führt. Unter geeigneten geometrischen Verhältnissen schwimmt die Wanne plötzlich nur noch in Öl, und das Wasser sinkt so stark, dass es gar keinen Kontakt mehr zur Wanne hat (*e*).

Wie aber verhält sich die ursprüngliche Wasseroberfläche zur Höhe der späteren Öloberfläche? Hier sind zwei Phasen des Prozesses zu unterscheiden: In der ersten schwimmt die Wanne mit ihrem unteren Ende noch in Wasser und oben schon in Öl, in der zweiten Phase nur noch in Öl.

Phase 2 ist relativ einfach zu verstehen: Schwimmt die Wanne vollständig in Öl und wird weiter Öl in den See gegossen, so ist die Situation die gleiche, wie wenn aus der Wanne Wasser in den See voller Wasser gegossen wird. Der Flüssigkeitsspiegel ändert sich also nicht mehr. Allerdings ist er jetzt höher als zu dem Zeitpunkt, als das gesamte Öl noch an Bord war.

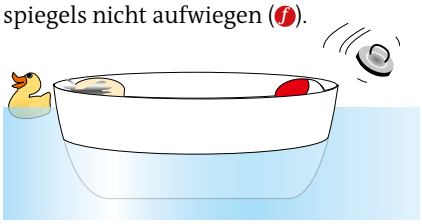
Vorher war in dem Gesamtvolumen unterhalb des Wasserspiegels (See plus eingetauchter Teil der Wanne) auch das vom Öl in der Wanne verdrängte Wasservolumen enthalten. Hinterher ist das Wasservolumen immer noch dasselbe. In der Wanne verdrängte aber das Öl, da es eine geringere Dichte hat als Wasser, weniger Wasservolumen, als es auf der Seeoberfläche einnimmt. Außerdem schwimmt nun die Wanne nicht mehr in Wasser, sondern in Öl. Deshalb muss sie dort mehr Flüssigkeit verdrängen (ein Kilogramm Öl hat ein Volumen von ungefähr 1,1 Liter) und taucht tiefer ein. Das heißt, der Flüssigkeitsspiegel steigt zusätzlich.

Phase 1 ist nun leicht erklärt: Vom Zeitpunkt des ersten eintröpfelnden Öls bis zu dem Punkt, an dem die Wanne vollständig in Öl schwimmt, muss der Flüssigkeitsspiegel kontinuierlich ansteigen.



Bei Alkohol ist die Angelegenheit noch verzwickter. Vorsichtig ins Wasser gekippt, überschichtet er dieses, und die Verhältnisse sind genau wie beim Öl: Der Flüssigkeitsspiegel steigt so lange, bis die Wanne vollständig in Alkohol schwimmt, und ändert sich danach nicht mehr.

Nun mischt sich aber durch Rühren oder, sehr viel langsamer, durch natürliche Diffusion der Alkohol mit dem Wasser. Dabei geschieht zweierlei. Der durch Wasser verdünnte Alkohol ist, so paradox das klingt, dichter als der reine; dadurch taucht die Wanne weniger tief ein, und der Flüssigkeitsspiegel sinkt. Zudem hat die Alkohol-Wasser-Mischung ein kleineres Volumen als die zuvor getrennten beiden Flüssigkeiten zusammen. Das senkt den Wasserspiegel zusätzlich noch etwas. Beide Effekte zusammen können allerdings das ursprüngliche Ansteigen des Flüssigkeitsspiegels nicht aufwiegen (*f*).



»Herr Dr. Klöbner, ziehen Sie den Stöpsel!«

Was jetzt geschehen würde, ist inzwischen klar. Da die Wanne aus Eisen besteht, geht sie wie die Eisenkugel im Wortsinn zu Grunde. Die Herren dagegen, mit Schwimmflügeln ausgestattet, verhalten sich analog zur Ente und finden – hoffentlich – schwimmend den Weg zur Tür. Die Luft, die vorher unterhalb der Wasserlinie war, entweicht und verdrängt nun kein Volumen mehr. Damit sinkt auch hier schlussendlich der Wasserspiegel.

Aber bevor das geschieht, finden die Herren zurück zu den unsterblichen Worten Loriots: »Es gibt Wichtigeres im Leben.«

»Was denn?«

»Ehrlichkeit, Toleranz …«

»Ja.«

»Mut, Anstand …«

»Ja. Ja.«

»Hilfsbereitschaft …«

»Jetzt ziehen Sie endlich den blöden Stöpsel …«

DER AUTOR

Thomas Rubitzko lehrt Physik und Physikdidaktik an der Pädagogischen Hochschule Ludwigsburg. Er hat von 1995 bis 2006 das Preisrätsel für »Spektrum der Wissenschaft« bearbeitet.

QUELLE

Epstein, L. C.: Denksport Physik. Deutscher Taschenbuch-Verlag, München 2011

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1142719

Astronomie ist unsere Passion. Schon seit 50 Jahren.

Jetzt im Miniabo kennen lernen!

Fordern Sie drei aktuelle Ausgaben von **Sterne und Weltraum** für nur € 15,30 (statt € 23,70 im Einzelkauf) an:*

06221 9126-743

service@spektrum.com

sterne-und-weltraum.de/miniabo

KOMPETENT: Das Magazin entsteht in enger Kooperation mit führenden Wissenschaftlern des Max-Planck-Instituts

INFORMATIV: Sie erhalten tiefe Einblicke in die aktuellsten nationalen und internationalen Forschungsprojekte

UMFASSEND: Neben Sternkunde bieten wir Ihnen alles über Raumfahrt, Satelliten und Planetensonden

JETZT IM HANDEL:
Heft 4/2012 mit großem Jubiläumsgewinnspiel und der Erstausgabe von 1962!

Spektrum DER WISSENSCHAFT
WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

online: sterne-und-weltraum.de
E-Mail: service@spektrum.com
Tel.: 06221 9126-743

Fax: 06221 9126-751
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg

* Wenn ich innerhalb von 10 Tagen nach Erhalt des dritten Hefts nichts von mir hören lasse, erhalte ich Sterne und Weltraum zum Vorzugspreis von nur € 85,20 inkl. Inlandsversand im Jahresabonnement (12 Ausgaben). Ermäßigter Preis (auf Nachweis) für Schüler und Studenten € 64,–. Ich kann das Jahresabonnement jederzeit kündigen, zu viel gezahltes Geld erhalte ich zurück. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-743, Fax 06221 9126-751, service@spektrum.com, www.spektrum.com

ALGEBRA

Von der Mitternachtsformel zur modernen Kryptografie – 200 Jahre Évariste Galois

Die Entdeckungen dieses impulsiven jungen Mannes haben die Mathematik nachhaltig beeinflusst. Dazu zählen insbesondere jene algebraischen Strukturen, die man heute endliche Körper nennt.

Von Antoine Chambert-Loir

Die vielfach erzählte Geschichte ist so voller Herzschmerz, Liebe, Tod und unverstandenem Genie, als wäre einem mittelmäßigen Romanautor die Fantasie durchgegangen: Genialer Jüngling folgt kompromisslos seinen politischen Idealen, scheitert aber an der Staatsmacht, die ihn zu der einen Schule nicht zulässt und von der anderen wegen seiner revolutionären Gesinnung verweist. Die etablierte Wissenschaft verwirft seine revolutionären Erkenntnisse, unfähig, ihre Tragweite zu verstehen. Er verliebt sich unglücklich in ein Mädchen, stellt sich ihretwegen unter dubiosen Umständen einem Duell, wird in den Bauch geschossen und stirbt tags darauf in den Armen seines Bruders. Noch in der Nacht vor dem tödlichen Zweikampf schreibt er in fieberhafter Eile einen Brief an einen Freund, in dem er den Entwurf einer völlig neuen Theorie zu Papier bringt. Auch dieses Werk wird von der Nachwelt zunächst verkannt und erst elf Jahre nach seinem Tod gewürdigt.

Das Erstaunliche ist: Die Geschichte ist wahr – bis auf kleine Korrekturen (Spektrum der Wissenschaft 6/1982, S. 104): Évariste Galois ist an der Aufnahmeprüfung zur École polytechnique nicht aus politischen Gründen gescheitert, sondern wegen mangelnder Vorbereitung (die ihrerseits politische Gründe gehabt haben mag). Und in jener schicksalhaften Nacht kann er schwerlich das sorgfältig ausgearbeitete Manuskript angefertigt haben, das der Nachwelt überliefert ist. Einige Korrekturen und die Randbemerkung »Ich habe keine Zeit« lassen darauf schließen, dass er in dieser Nacht das Manuskript nur überarbeitet hat.

Das tut jedoch der wissenschaftlichen Bedeutung seines Werks, das gerade einmal 60 Seiten umfasst, keinen Abbruch. Galois hat die Mathematik seiner Zeit revolutioniert, und seine Errungenschaften wirken bis heute fort. Im Folgenden will ich einige von ihnen näher vorstellen. An dieser Stelle kann ich die Themen nur mit – später zu klärenden – Fachausdrücken umreißen:

- die Lösungstheorie für polynomiale Gleichungen,
- das Rechnen mit Kongruenzen modulo einer Primzahl,
- die Theorie der endlichen Körper und
- ihre Anwendung in der Kryptografie, die so genannte asymmetrische Verschlüsselung.

Die einfachsten polynomialen Gleichungen sind ein Standardthema der Schulmathematik: die quadratischen Gleichungen. Sie haben die Form $ax^2+bx+c=0$. Dabei sind a, b und c Zahlen, die man als bekannt voraussetzt; die Zahl x ist die »Unbekannte« in der Gleichung. Gesucht sind Zahlen, die, für x eingesetzt, ein korrektes Ergebnis liefern. Man nennt sie die Lösungen oder auch Wurzeln der Gleichung.

AUF EINEN BLICK

EIN GENIESTREICH UND SEINE FOLGEN

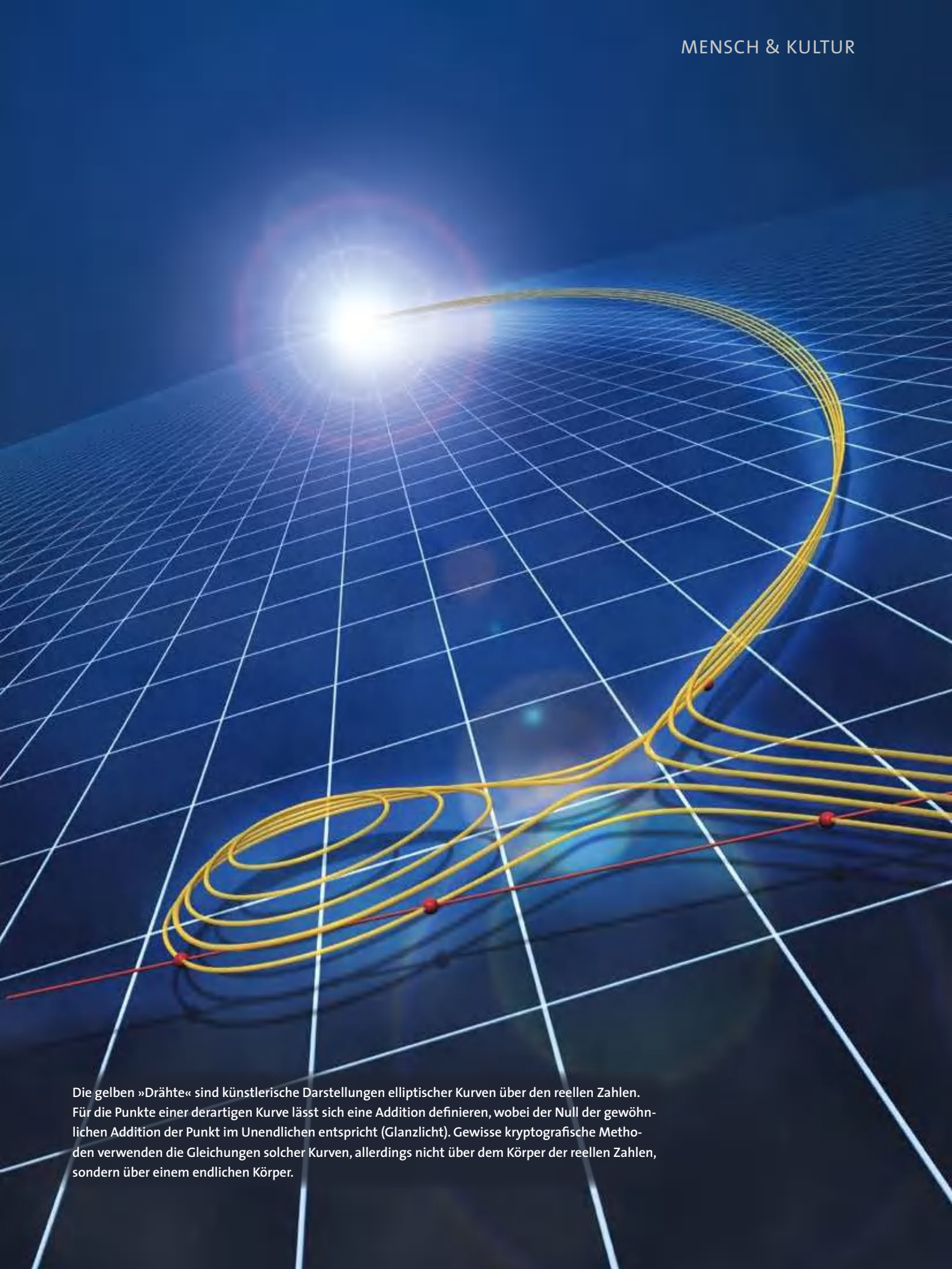
1 **Évariste Galois** (1811–1832) war ein genialer, zu Lebzeiten unverstandener Mathematiker. Er starb jung unter tragischen Umständen.

2 Galois entdeckte ein wichtiges Kriterium, mit dem man feststellen kann, ob eine **Polynomgleichung** durch Anwendung der Grundrechenarten und der Wurzelfunktionen lösbar ist.

3 Sein Werk steht am Anfang der **Gruppentheorie** und der **Theorie der endlichen Körper**.

4 Galois' mathematisches Erbe durchzieht zahlreiche Gebiete und hat Anwendungen beispielsweise in der **Kryptografie**.

BRUNO BURGEOIS



Die gelben »Drähte« sind künstlerische Darstellungen elliptischer Kurven über den reellen Zahlen. Für die Punkte einer derartigen Kurve lässt sich eine Addition definieren, wobei der Null der gewöhnlichen Addition der Punkt im Unendlichen entspricht (Glanzlicht). Gewisse kryptografische Methoden verwenden die Gleichungen solcher Kurven, allerdings nicht über dem Körper der reellen Zahlen, sondern über einem endlichen Körper.

Évariste Galois, ein tragischer Held der Mathematik

PUBLIC DOMAIN

Évariste Galois wird am 25. Oktober 1811 in Bourg-la-Reine südlich von Paris geboren. Im Alter von 20 Jahren stirbt er am 31. März 1832 an den Folgen eines Duells, dem er »sich nicht entziehen kann«. Nach seinen eigenen Worten ging es um »eine infame Kokette und zwei von dieser Koketten Betrogene«.

Ab seinem 16. Lebensjahr wird die Mathematik neben der Politik eine seiner Leidenschaften. Schlecht vorbereitet, fällt er bei der Aufnahmeprüfung zur École polytechnique, der angesehensten Hochschule seiner Zeit, zweimal durch. Er wird in die École préparatoire, die spätere École normale supérieure, aufgenommen, jedoch 1831 wieder von dieser verwiesen. Kurze Zeit später reicht er der Pariser Académie seine Abhandlung »Sur les conditions de résolubilité des équations par radicaux« (»Über die Bedingungen der Lösbarkeit von Gleichungen durch Wurzeln«) ein. Der Text geht zunächst in der Académie verloren und wird später von den Gutachtern Sylvestre François Lacroix (1765–1843) und Siméon Denis Poisson (1781–1840) verworfen.

Das mathematische Werk von Galois bleibt unbeachtet, bis sein Bruder Alfred und sein Freund Auguste Chevalier es Joseph Liouville (1809–1882) vorlegen. Liouville erkennt die Bedeutung der Arbeiten, stellt sie 1843 der Académie vor und veröffentlicht sie ab 1846.

Im Allgemeinen steht auf der linken Seite einer Polynomgleichung eine Summe von Termen, die aus einer bekannten Zahl mal einer Potenz von x bestehen, zum Beispiel $2x^4+8x^3-6x^2+7x-5=0$. Der größte dabei auftretende Exponent (in diesem Beispiel 4) heißt Grad der Gleichung.

Polynomiale Gleichungen vom Grad 1 sind sehr einfach zu lösen. Ein Beispiel: In der Gleichung $3x-5=0$ bringe man die Fünf auf die rechte Seite und dividiere beide Seiten der Gleichung durch 3. Schon ergibt sich die Lösung $x=5/3$.

Für Polynomgleichungen zweiten Grades – besser bekannt als »quadratische Gleichungen« – gibt es eine Lösungsformel. Seit etwa 400 Jahren schreibt man sie in der Form

$$x = \frac{1}{2a}\left(-b \pm \sqrt{b^2-4ac}\right) \ .$$

Eigentlich eine große kulturelle Errungenschaft, hat sie unter deutschen Schülern den wenig schmeichelhaften Namen »Mitternachtsformel«, weil man sie, aus mitternächtlichem Tiefschlaf gerissen, auf der Stelle auswendig herbeten können soll. Im Beispiel der Gleichung $x^2-x-1=0$ liefert die Mitternachtsformel die Lösungen $x=(1\pm\sqrt{5})/2$. Diejenige mit dem positiven Vorzeichen, also $x=(1+\sqrt{5})/2$, ist übrigens das Verhältnis des goldenen Schnitts.

In der Zahlentheorie ist der Fall, dass die Koeffizienten a, b und c ganze Zahlen sind, von besonderem Interesse. Unter dieser Bedingung sind die Lösungen der Gleichung genau dann rationale Zahlen, wenn die so genannte Diskriminante b^2-4ac das Quadrat einer natürlichen Zahl ist; dann und nur dann nämlich ergibt sich beim Wurzelziehen eine ganze Zahl. Ist die Diskriminante negativ, so muss man eine Wurzel aus einer negativen Zahl ziehen. Das ist unmöglich, jedenfalls innerhalb der gewohnten reellen Zahlen, denn das Quadrat einer solchen Zahl kann nie negativ sein.

Zahlen erschaffen aus dem Nichts

Aus dieser Sackgasse befreiten sich die Mathematiker auf eine sehr fachtypische Weise. Sie sagten »Es werde i«, das heißt, sie definierten eine Zahl namens i mit der Eigenschaft, dass $i^2=-1$ ist. »Und es ward i«, aber nicht kraft göttlicher Allmacht, sondern weil dieser scheinbare Akt der Willkür weder auf einen Widerspruch noch in die totale Beliebigkeit führt – was selbstverständlich erst bewiesen werden musste. Mit dieser Wurzel aus –1, der »imaginären Einheit« i, kann man Zahlen der Form $x+yi$ bilden, wobei x und y gewöhnliche reelle Zahlen sind: die »komplexen Zahlen« (Spektrum der Wissenschaft 10/2011, S. 54).

Komplexe Zahlen kann man addieren: Die Summe von $x+yi$ und $x'+y'i$ ist $(x+x')+(y+y')$i. Man kann sie auch multiplizieren. Rechnet man das Produkt der beiden obigen Zahlen nach den gängigen Regeln aus, so ergibt sich $(x+yi)\cdot(x'+y'i)=xx'+(yx'+xy')i+yy'i^2=(xx'-yy')+(yx'+xy')i$, denn $i^2=-1$. Ein wenig weiteres Nachrechnen liefert die Gewissheit, dass die üblichen Rechenregeln auch für die Addition und die Multiplikation komplexer Zahlen gelten; die Umkehrungen dieser Operationen, also die Subtraktion und die Division, sind stets durchführbar und ergeben wieder komplexe Zahlen – ausgenommen natürlich die Division durch null.

Mittlerweile nehmen die komplexen Zahlen einen zentralen Platz in der Mathematik und zahlreichen anderen Gebieten der Naturwissenschaften ein. Das liegt nicht zuletzt daran, dass nicht nur jede quadratische, sondern allgemein jede polynomiale Gleichung in den komplexen Zahlen genau so viele Lösungen hat, wie ihr Grad angibt. Dabei schadet es nicht, wenn die Koeffizienten der Gleichung – a, b, c und so weiter – selbst komplexe Zahlen sind; es ist aber auch nicht erforderlich. Es gibt Gleichungen mit reellen Koeffizienten, die nur komplexe Lösungen haben, zum Beispiel $x^2+1=0$.

Nun ist es zwar schön zu wissen, dass es diese Lösungen gibt; aber damit kann man sie noch nicht ausrechnen. Die Mitternachtsformel ist auch im Komplexen anwendbar; aber wie steht es mit den Gleichungen höheren Grades?

Im 16. Jahrhundert fanden die Italiener Geronimo Cardano (1501–1576), Nicolo Tartaglia (1500–1557) und Lodovico

Gruppen und Körper

Eine Gruppe ist eine Menge, auf der eine Verknüpfung mit gewissen Eigenschaften definiert ist. Das heißt: Zu je zwei Elementen a und b einer Gruppe gibt es genau ein Element der Gruppe, das man je nach Kontext als

- ab (Produkt von a und b),
- $a+b$ (Summe von a und b) oder auch
- $a \circ b$ (Komposition oder Hintereinanderausführung von a und b)

bezeichnet. Für diese Verknüpfung (im Folgenden als $\circ$ geschrieben) gelten folgende Regeln (die Gruppenaxiome):

- $(a \circ b) \circ c = a \circ (b \circ c)$ (Assoziativität);
- Die Gruppe enthält ein neutrales Element e mit der Eigenschaft $a \circ e = e \circ a = a$ für alle Gruppenelemente a. Statt e schreibt man im Allgemeinen 1, wenn die Gruppenverknüpfung als Multiplikation dargestellt wird, und 0 bei additiv geschriebenen Gruppen.
- Zu jedem Gruppenelement a gibt es ein inverses Element, das als a^{-1} (in der additiven Schreibweise: $-a$) bezeichnet wird, mit der Eigenschaft $a \circ a^{-1} = a^{-1} \circ a = e$.

Klassische Beispiele für Gruppen sind die Menge der ganzen Zahlen mit der Addition als Verknüpfung, die Menge der rationalen Zahlen ungleich null mit der Multiplikation als Verknüpfung und die Menge aller Permutationen der Zahlen von 1 bis n. Hier ist $a \circ b$ die Permutation, die sich ergibt, wenn man zuerst b, dann a anwendet.

Ein Körper ist eine (additiv geschriebene) Gruppe mit der Eigenschaft, dass alle seine Elemente außer der Null auch eine (multiplikativ geschriebene) Gruppe bilden. Dabei stehen Addition und Multiplikation durch die Regel

- $(a+b) \cdot c = a \cdot c + b \cdot c$ (Distributivität der Multiplikation bezüglich der Addition)

in Beziehung. Zusätzlich soll sowohl für die Addition als auch für die Multiplikation

- $a+b = b+a$ beziehungsweise $ab = ba$ (Kommutativität)

gelten. Klassische Beispiele für Körper sind die Menge der rationalen, der reellen und der komplexen Zahlen. Die Quaternionen und die Oktonionen (Spektrum der Wissenschaft 10/2011, S. 54) bilden keine Körper, weil sie einige der Axiome nicht erfüllen.

Die Subtraktion und die Division muss man nicht eigens definieren: $a-b$ ist eine Kurzschreibweise für $a+(-b)$ (verknüpfe a mit dem Inversen von b). Entsprechend ist $a/b = ab^{-1}$.

Ein Körper muss nicht unendlich viele Elemente haben. Es müssen allerdings mindestens zwei sein, nämlich die beiden neutralen Elemente. Das genügt auch: Die Menge {0, 1} wird mit Hilfe der nebenstehenen Tabelle zu einem Körper. Hierbei ist die Gleichung $1+1=0$ die einzige, die nicht unmittelbar durch die Axiome vorgeschrieben ist.

+	0	1
0	0	1
1	1	0

·	0	1
0	0	0
1	0	1

Allgemein könnte man auf die Idee kommen, für eine beliebige natürliche Zahl $n \geq 2$ die Menge $\{0, 1, 2, \ldots, n-1\}$ zu einem Körper zu machen, indem man festlegt, dass die Summe zweier Elemente gleich dem Rest ist, den die gewöhnliche Summe der beiden Zahlen bei Division durch n lässt, ebenso für das Produkt. Das ergibt jedoch im Allgemeinen nur eine Struktur minderer Qualität, einen so genannten Ring. Es existiert nämlich nicht zu jedem Element ungleich null ein Inverses bezüglich der Multiplikation.

Nur wenn n eine Primzahl ist, wird die Menge $\{0, 1, 2, \ldots, n-1\}$ zu einem Körper. Derartige Strukturen hat Carl Friedrich Gauß im Detail in seinen »Disquisitiones arithmeticae« von 1798 (gedruckt 1801) studiert.

Ferrari (1522–1565) Lösungsformeln für Gleichungen dritten und vierten Grades. Allerdings wäre es aussichtslos, deren mitternächtliches Rezitieren einzufordern: Sie enthalten nicht nur – unvermeidlich – dritte beziehungsweise vierte Wurzeln, sondern sind auch überaus kompliziert.

Mehr geht nicht. Für Gleichungen höheren Grades gibt es zwar Lösungsformeln in Spezialfällen; so ist es nicht schwer, zu der Gleichung $x^5 - a = 0$ die Lösung $x = \sqrt[5]{a}$ anzugeben. Aber es kann keine allgemeine Formel nach dem Vorbild der Mitternachtsformel geben.

Für die Gleichungen fünften Grades entdeckte das im 19. Jahrhundert der norwegische Mathematiker Niels Henrik Abel (1802–1829). Eine der größten Leistungen von Galois besteht in der Erklärung, warum dem so ist.

Zu diesem Zweck griff Galois auf die Tatsache zurück, dass man über die »Wurzeln«, das heißt die Lösungen, einer Gleichung gewisse algebraische Aussagen machen kann, ohne die Wurzeln selbst zu kennen. Die einfachsten Aussagen dieser Art lernen die Schüler im Gefolge der Mitternachtsformel. Bezeichnen wir die beiden Lösungen der quadratischen Gleichung $x^2 + px + q = 0$ mit x_1 und x_2. Nach dem Wurzelsatz von Vieta (François Viète, 1540–1603) gilt dann $x_1 + x_2 = -p$ und $x_1 x_2 = q$. Diese algebraischen Beziehungen ändern sich nicht, wenn man x_1 und x_2 vertauscht. Ähnliche Wurzelsätze gibt es auch für Gleichungen höheren Grades.

Wenn über solche stets gültigen Sätze hinaus gewisse Wurzeln einer Gleichung eine besondere Beziehung zueinander haben, genauer gesagt: wenn zwischen ihnen eine algebraische Gleichung mit rationalen Koeffizienten gilt, dann könnte man diese Beziehung nutzen, um zumindest für diese speziellen Wurzeln eine explizite Lösungsformel anzugeben. Genau dann aber könnte man, wie sich herausstellt, nicht beliebige andere Wurzeln derselben Gleichung an die Stelle der speziellen Wurzeln setzen. Es wären also nicht beliebige Vertauschungen (»Permutationen«) der Wurzeln untereinander zulässig.

Auf diese Weise führte Galois die Frage nach der Auflösbarkeit einer Gleichung auf die Zulässigkeit von Permutationen der Wurzeln zurück. Alle denkbaren Permutationen bilden eine Gruppe; das ist eine mathematische Struktur, in der man je zwei Elemente derart miteinander verknüpfen kann, dass wieder ein Gruppenelement entsteht (Kasten S. 55).

Nicht nur die Menge aller Permutationen von – zum Beispiel – fünf Elementen ist eine Gruppe, sondern auch die Menge der im oben genannten Sinn zulässigen Permutationen; man nennt sie heute die Galois-Gruppe der Gleichung. Die Gruppentheorie, die Galois aus Anlass dieser Fragestellung in den Grundzügen entwickelte, gestattet nun eine Fülle allgemeiner Aussagen über Gruppen von Permutationen. So konnte Galois beweisen, dass man die Lösungen einer Gleichung dann und nur dann mit Hilfe einer expliziten Formel berechnen kann, wenn die Galois-Gruppe der Gleichung eine bestimmte Eigenschaft namens »Auflösbarkeit« hat.

Die Gruppe aller Permutationen von fünf Elementen ist nicht auflösbar. Galois musste schließlich nur noch zeigen, dass es eine Gleichung fünften Grades gibt, deren Galois-Gruppe tatsächlich alle Permutationen enthält. Das gelang ihm, ohne dass er die Wurzeln der Gleichung kennen musste. In der Tat ist die Nichtauflösbarkeit unter den Gleichungen fünften Grades der Regelfall und die Auflösbarkeit die Ausnahme.

Von den Kongruenzen zu den endlichen Körpern

Eine andere bedeutende Entdeckung Galois' sind die endlichen Körper, die im Englischen auch »Galois fields« (Galois-Körper) heißen. Sie sind Thema der kurzen Abhandlung »Sur la théorie des nombres« (»Zur Zahlentheorie«) aus dem Jahr 1830. In modernen Begriffen ausgedrückt, stellte sich Galois hier die Aufgabe, die Theorie der Polynomgleichungen und das Rechnen mit den Resten bei der Division durch eine natürliche Zahl n miteinander in Beziehung zu setzen. Für Letzteres ist der Fachausdruck »Kongruenz modulo n« gebräuchlich. Was bedeutet das?

Im chinesischen »Sun Tzu Suan Ching« (Arithmetisches Handbuch von Meister Sun), das auf ungefähr das 5. Jahr-

Potenzen schnell berechnen

Um die Potenz x^a zu berechnen, muss man eigentlich nur a-mal x mit sich selbst multiplizieren. Wenn aber a eine 600-stellige Binärzahl ist, wie in der Kryptografie üblich, würde der Zeitaufwand dafür das Alter des Universums weit übersteigen.

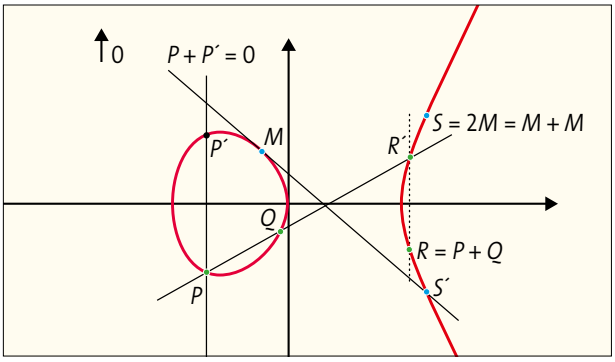
Es gibt jedoch eine Abkürzung. Sie beruht auf der Binärdarstellung der natürlichen Zahl a und der Tatsache, dass $x^a = (x^2)^{a/2}$ ist, falls a gerade ist, und dass $x^a = x\,(x^2)^{(a-1)/2}$ ist für ungerades a. Beispielsweise gilt $x^{19} = x(x^2)(x^{16})$, wobei sich x^{16} durch viermaliges Quadrieren berechnen lässt: $x^{16} = (((x^2)^2)^2)^2$. So erhält man eine rekursive Berechnungsmethode, die statt 2^{600} nur etwa $2 \cdot 600$ Multiplikationen erfordert.

Addition auf einer elliptischen Kurve

Elliptische Kurven sind keine Ellipsen. Sie tragen ihren Namen, weil ihre Gleichungen bei der Berechnung der Bogenlänge von Ellipsen eine Rolle spielen. Eine elliptische Kurve wird definiert durch eine kubische Gleichung der Form $y^2 = x^3 + ux + v$. Dabei sind u und v reelle Zahlen mit der Eigenschaft, dass $4u^3 + 27v^2$ ungleich null ist (anderenfalls hätte die Kurve einen singulären Punkt).

Bemerkenswerterweise kann man für die Punkte einer elliptischen Kurve E eine Addition erklären. Die Summe zweier Kurvenpunkte P und Q wird folgendermaßen definiert: Die Gerade durch die Punkte P und Q trifft die Kurve stets in einem dritten Punkt; nennen wir ihn R'. Dann ist der Punkt $R = P + Q$ das Spiegelbild von R' bezüglich der x-Achse, die zugleich die horizontale Symmetrieachse der Kurve ist. Verläuft die Gerade durch P und Q vertikal, so betrachtet man R als unendlich; der unendlich ferne Punkt wird als die Null der Addition definiert. Fällt P mit Q zusammen, so definiert die Tangente an die Kurve im Punkt P den Punkt $R = P + P = 2P$. Insbesondere ist die Summe dreier Punkte P, Q und R genau dann gleich null, wenn diese drei Punkte auf einer Geraden liegen.

Versehen mit dieser Addition bilden die Punkte der elliptischen Kurve eine additive Gruppe (Kasten S. 55).



GRAFIKEN DIESER DOPPELSEITE: FOUR IA SCIENCE

Man kann eine elliptische Kurve auch über einem anderen Körper als dem der reellen Zahlen betrachten (Bild S. 57 oben, unteres Teilbild), zum Beispiel einem endlichen Körper F. In diesem Fall sind die Parameter u und v Elemente von F; die elliptische Kurve besteht aus allen Lösungen (x, y) der Gleichung $y^2 = x^3 + ux + v$, betrachtet über dem Körper F, plus der Null.

Elliptische Kurven spielen eine zentrale Rolle in dem Beweis von Andrew Wiles für den »großen Satz von Fermat«: Die Gleichung $a^n + b^n = c^n$ hat für $n > 2$ keine Lösung mit natürlichen Zahlen a, b und c (Spektrum der Wissenschaft 8/1993, S. 14).

hundert datiert wird, findet sich folgende Aufgabe: »Wir haben eine unbekannte Zahl von Dingen. Zählen wir diese zu dreien ab, so bleiben zwei übrig, zählen wir sie zu je fünfen, so ergibt sich als Rest drei, zählen wir sie zu je sieben, bleibt ein Rest von zwei. Finde die Anzahl der Dinge.«

Nennen wir die unbekannte Anzahl x, so besagt der zentrale Satz der Aufgabenstellung dreierlei: x ist die Summe aus 2 und einem (unbestimmten) Vielfachen von 3; x ist gleich 3 plus ein Vielfaches von 5 und gleich 2 plus ein Vielfaches von 7. Diese Gleichheit bis auf Vielfache einer gewissen natürlichen Zahl nennt man Kongruenz. Man sagt, dass x kongruent 2 modulo 3, kongruent 3 modulo 5 und kongruent 2 modulo 7 ist, und schreibt das in der Form $x \equiv 2 \pmod 3$, $x \equiv 3 \pmod 5$, $x \equiv 2 \pmod 7$. Die natürlichen Zahlen 3, 5 und 7 heißen Module dieser Kongruenzen.

Das »Sun Tzu Suan Ching« gibt zur Aufgabe auch ein Lösungsverfahren. Der zugehörige mathematische Satz heißt heute »chinesischer Restsatz«. Man addiere $2 \cdot 70$, $3 \cdot 21$ und $2 \cdot 15$ (das macht $140 + 63 + 30 = 233$) und ziehe davon so oft 105 ab, bis das Ergebnis kleiner als 105 ist. Woher kommen diese merkwürdigen Faktoren? 70 ist ein gemeinsames Vielfaches von 5 und 7 und obendrein kongruent 1 modulo 3 (denn $70 = 23 \cdot 3 + 1$). 21 ist ein Vielfaches von 3 und 7, das kongruent 1 modulo 5 ist ($21 = 4 \cdot 5 + 1$), und 15 ist ein Vielfaches von 3 und 5, das kongruent 1 modulo 7 ist. Außerdem ist $105 = 3 \cdot 5 \cdot 7$. Also findet man in unserem Beispiel, dass x kongruent 23 modulo 105 ist. Damit sind die drei einzelnen Kongruenzen modulo der Primzahlen 3, 5 und 7 zu einer einzigen zusammengefasst, deren Modul 105 gleich dem Produkt der einzelnen Module 3, 5 und 7 ist.

Es stellt sich heraus, dass man beim Rechnen mit Kongruenzen die unbestimmten Vielfachen des Moduls komplett vernachlässigen kann. Bei Bedarf setzt man sie einfach gleich null. So gilt modulo 13 beispielsweise $6 \equiv -7$, weil $6-(-7) = 13 \equiv 0 \pmod{13}$ ist, und $5 \cdot 7 = 35 \equiv 3 \cdot 13 - 4 \equiv -4$.

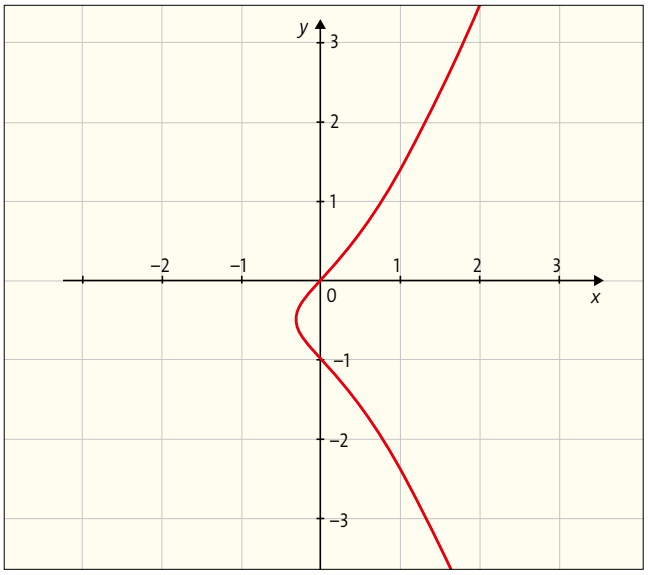
Man kann auch Gleichungen mit Kongruenzen lösen. Ein Beispiel: $3x - 5 \equiv 0 \pmod 7$. Multipliziert man beide Seiten mit 2, so erhält man $6x - 10 \equiv 0 \pmod 7$. Da aber $6 \equiv -1 \pmod 7$ und $-10 = -14 + 4 \equiv 4 \pmod 7$ ist, ergibt sich $-x + 4 \equiv 0 \pmod 7$ und daraus $x \equiv 4 \pmod 7$. Die Probe bestätigt das Ergebnis: Aus $x \equiv 4$ folgt $3x \equiv 12 \equiv 5 \pmod 7$.

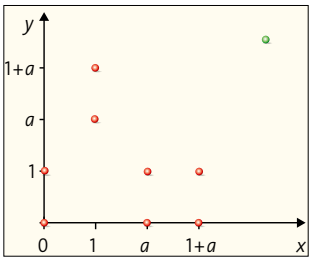
Es sind allerdings gewisse Feinheiten zu beachten. So sind 2 und 3 nicht kongruent 0 modulo 6, wohl aber ihr Produkt. Das Produkt zweier Zahlen kann (bezüglich eines bestimmten Moduls) kongruent zu null sein, ohne dass einer der beiden Faktoren es ist.

Damit bricht ein wesentlicher Teil der Struktur zusammen. Wenn $2 \cdot 3 \equiv 0$ ist – wie soll man dann noch dividieren können? Null geteilt durch 3 gleich 2? Das führt auf der Stelle auf hoffnungslose Widersprüche. Ein Produkt ist genau dann null, wenn einer seiner Faktoren null ist; an dieser elementaren Tatsache hängt die Existenz der Division.

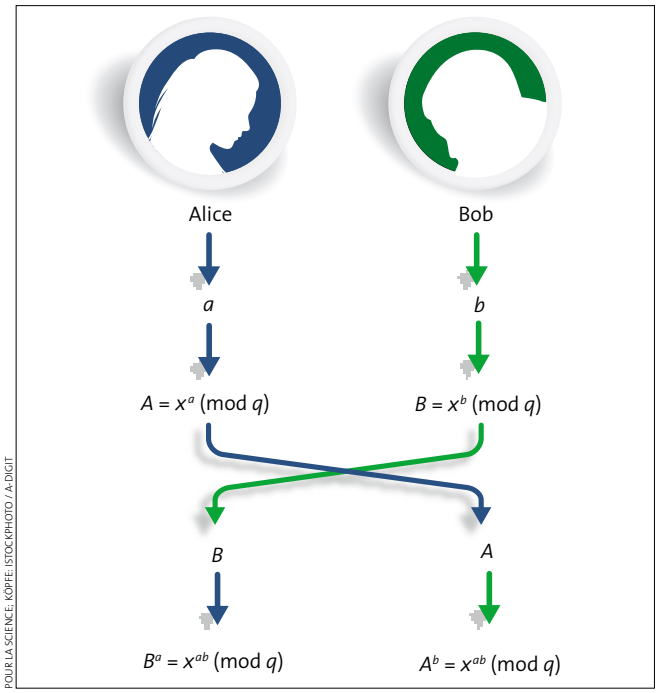
Nur dann, wenn der Modul eine Primzahl ist – und genau dann –, können die fatalen »Nullteiler« nicht vorkommen. Aus diesem Grund sind die Kongruenzen modulo einer Primzahl die fundamentalsten in der Mathematik. Die Menge $\{0, 1, 2, \ldots, n-1\}$ der Reste modulo einer Primzahl n ist ein Körper – das heißt, man kann in ihm die Grundrechenarten mit denselben Rechenregeln anwenden wie in den gewöhnlichen (rationalen oder reellen) Zahlen (Kasten S. 55). Nur das Ergebnis einer solchen Rechnung ist im Allgemeinen anders.

Insbesondere kann man in einem solchen Körper auch Polynomgleichungen lösen. Nehmen wir als Beispiel die Gleichung des goldenen Schnitts $x^2 - x - 1 = 0$ modulo 7 oder modulo 11. In der klassischen Algebra würden wir $x^2 - x$ zu dem vollständigen Quadrat $x^2 - x + 1/4 = (x - 1/2)^2$ ergänzen, danach alles, was an konstanten Termen übrig bleibt, auf die rechte Seite der Gleichung schaffen und auf beiden Seiten der Gleichung die Wurzel ziehen. (Dies ist die Vorgehensweise, die hinter der Mitternachtsformel steckt.) Aber Dividieren geht modulo 7 anders als gewohnt: $1/2 = 4$ und $1/4 = 2$, denn $4 \cdot 2 = 8 \equiv 1 \pmod 7$. Deswegen schreiben wir $0 = x^2 - x - 1 \equiv x^2 - 8x - 1 \equiv (x-4)^2 - 17 \equiv (x-4)^2 - 3 \pmod 7$. Jetzt müsste man die Wurzel aus 3 ziehen, das heißt, eine ganze Zahl zwischen 0 und 6 finden, deren Quadrat $\equiv 3 \pmod 7$ ist. Probieren wir's durch: $0^2 = 0$, $1^2 = 1$, $2^2 = 4$, $3^2 = 9 \equiv 2$, $4^2 \equiv (-3)^2 \equiv 2$, $5^2 \equiv (-2)^2 \equiv 4$





Die Gleichung einer ebenen Kurve hat die Form $f(x, y) = 0$. So ist die Gleichung der oben gezeigten elliptischen Kurve $y + y^2 = x^3 + x^2 + x$. Eine derartige Gleichung lässt sich nicht nur über dem Körper der reellen Zahlen, sondern auch über einem endlichen Körper betrachten. Ein Beispiel hierfür ist der Körper mit $4 = 2^2$ Elementen ($p = 2$, $d = 2$), dessen Elemente die Polynome 0, 1, a und $1 + a$ sind (wobei $1 + 1 = 0$ und $a^2 = a + 1$ gilt). Die entsprechende elliptische Kurve besteht aus acht Punkten (untere Grafik), zu denen noch der unendlich ferne Punkt als Nullelement hinzukommt (grün).



POUR LA SCIENCE; KÖPFE: ISTOCKPHOTO / A-DIGIT

Das Austauschprinzip ermöglicht es den beiden Partnern Alice und Bob, sich ein gemeinsames Geheimnis, nämlich x^{ab} (mod q), zuzulegen. Selbst ein Lauscher, der die öffentlichen Daten x und q sowie die zwischen beiden übermittelten Nachrichten x^a und x^b kennt, kann das Geheimnis nicht erschließen. Dabei ist q die Anzahl der Elemente eines endlichen Körpers und x eine primitive Wurzel dieses Körpers.

und $6^2 \equiv (-1)^2 \equiv 1$. Es stellt sich heraus: Modulo 7 gibt es keine Wurzel aus 3 und damit keine Lösung für unsere Gleichung.

Modulo 11 schreibt man entsprechend: $0 = x^2 - x - 1 \equiv x^2 - 12x - 1 \equiv (x-6)^2 - 37 \equiv (x-6)^2 - 4$ (mod 11). Folglich muss gelten: $(x-6)^2 \equiv 4 \equiv 2^2$. Hieraus schließt man (wie gewohnt), dass $x - 6 = \pm 2$ sein muss. Also findet man modulo 11 die beiden Lösungen $x = 4$ und $x = 8$.

Polynomiale Gleichungen und Kongruenzen

Wo eine Wurzel nicht existiert – wie die Wurzel aus 3 modulo 7 –, da erschafft der Mathematiker sich eine; das hat ja schon mit der Wurzel aus –1 hervorragend funktioniert. Galois machte sich zur Aufgabe, derartige Zahlen – die er wieder imaginär nannte – zu finden, während seine Vorgänger sich mit der Nichtexistenz gewisser Wurzeln begnügt hatten.

In den Fußstapfen von Galois betrachten wir ein beliebiges Polynom $F(x)$ vom Grad d mit ganzzahligen Koeffizienten. Dabei sollen alle Rechnungen im Körper der Zahlen modulo einer Primzahl p stattfinden. Der Koeffizient des höchsten Glieds x^d soll nicht null modulo p sein – sonst wäre das Polynom in Wirklichkeit vom Grad $d-1$ oder weniger. Zudem soll das Polynom »irreduzibel« sein, das heißt nicht zerlegbar in Faktoren niedrigeren Grades, ähnlich wie eine Primzahl nicht in kleinere Faktoren zerlegbar ist – sonst würde es genügen, diese Faktoren zu betrachten. Diese Bedingung schließt etwa das Polynom $F(x) = x^2 + 1$ modulo 13 aus, denn $x^2 + 1 \equiv (x-5)(x-8)$ (mod 13). Dagegen ist $F(x) = x^2 + 1$ irreduzibel modulo $p = 11$, ebenso $F(x) = x^2 - 2$ modulo p = 13 und $F(x) = x^2 - x - 1$ modulo $p = 7$.

Das Symbol i wurde eingeführt, um eine der Wurzeln der Gleichung $x^2 + 1 = 0$ zu bezeichnen. Mit diesem ließ sich dann in ganz natürlicher Weise rechnen. Genauso geht es auch hier: Wir behandeln den Buchstaben x nicht mehr als eine Unbekannte, sondern als eine Lösung der Gleichung $F(x) \equiv 0$ (mod p). Diese neue Zahl fügen wir unserem Primzahlkörper hinzu. Damit man in dem so erweiterten Körper uneingeschränkt rechnen kann, muss man dann auch gleich sämtliche Zahlen der Form $a_0 + a_1x + \ldots + a_{d-1}x^{d-1}$ hinzufügen. Jeder der Koeffizienten $a_0, a_1, \ldots a_{d-1}$ ist aus dem Primzahlkörper, also eine natürliche Zahl zwischen 0 und $p-1$. Das macht p Möglichkeiten für jeden Koeffizienten und damit insgesamt p^d verschiedene Zahlen, die Elemente des ursprünglichen Körpers eingeschlossen.

Diese Zahlen lassen sich addieren und subtrahieren: Man fasse eine Summe beziehungsweise Differenz zweier Zahlen der Form $a_0 + a_1x + \ldots + a_{d-1}x^{d-1}$ nach Potenzen von x zusammen; zu einem sich so ergebenden neuen Koeffizienten muss man möglicherweise noch ein Vielfaches von p addieren, damit er wieder in den Bereich von 0 bis $p-1$ gerät. Überraschender ist es vielleicht, dass man die neuen Objekte auch multiplizieren kann. Das Produkt zweier Zahlen der Form $a_0 + a_1x + \ldots + a_{d-1}x^{d-1}$ enthält zwar auch Potenzen von x, deren Exponent größer als $d-1$ ist. Aber indem wir die definierende Gleichung $F(x) \equiv 0$ (mod p) einsetzen, können wir x^d durch eine zulässige Zahl ersetzen, ebenso x^{d+1} und so weiter.

Ist zum Beispiel $F(x) = x^3 + 2x - 1 \equiv 0$ (mod 5) die definierende Gleichung, so folgt $x^3 \equiv -2x + 1 \equiv 3x + 1$ (mod 5). Also ersetzen wir x^3 überall, wo es vorkommt, durch $3x+1$. Insbesondere ergibt sich daraus $x^4 \equiv 3x^2 + x$ (mod 5), $x^5 \equiv 3x^3 + x^2 \equiv 3(3x+1) + x^2 \equiv x^2 + 9x + 3 \equiv x^2 + 4x + 3$ (mod 5), und so weiter. Schließlich kann man auch durch jede Zahl ungleich null dividieren. Hier geht die Bedingung ein, dass F irreduzibel ist.

Im Ergebnis erhält man einen Körper (Kasten S. 55) mit endlich vielen, nämlich p^d Elementen. In seiner Abhandlung erläutert Galois anschließend einige Eigenschaften dieser endlichen Körper. Zuerst zeigt er, dass für jedes Element a eines endlichen Körpers mit p^d Elementen die Gleichung $a^{(p^d)} \equiv a$ gilt. Damit verallgemeinert er den »kleinen Satz von Fermat«, der für jede natürliche Zahl a und jede Primzahl p die Aussage $a^p \equiv a \pmod{p}$ macht. Weiter zeigt Galois, dass die Gleichung $a^{(p^d)} = a$ eine primitive Wurzel besitzt. Anders ausgedrückt, es gibt ein Element a mit der Eigenschaft, dass die Folge $0, 1, a, a^2, \ldots, a^{(p^d-2)}$ exakt alle Elemente des Körpers durchläuft.

Will man nach der Methode von Galois einen endlichen Körper mit genau p^d Elementen konstruieren, so muss man von einem modulo p irreduziblen Polynom $F(x)$ vom Grad d ausgehen. Galois bewies, dass jedes derartige Polynom ein Faktor des Polynoms $x^{(p^d)} - x$ ist. Wenig später zeigte der französische Mathematiker und Astronom Joseph Serret (1819–1885), dass man einen derartigen Faktor immer finden kann. Also existiert zu jeder Potenz p^d einer Primzahl p ein endlicher Körper mit p^d Elementen. Dieser ist sogar eindeutig bis auf Isomorphie. Das heißt: Zwischen je zwei endlichen Körpern mit gleich vielen Elementen (die man beispielsweise erhält, indem man die Konstruktion von Galois für zwei Polynome F_1 und F_2 durchführt) existiert eine umkehrbar eindeutige Zuordnung, die mit den Rechenregeln kompatibel ist.

Von den endlichen Körpern zur Kryptografie

In den folgenden Jahrzehnten vervollständigten mehrere Mathematiker die Arbeiten von Galois; insbesondere formalisierten sie den Begriff des Körpers im modernen Sinn (Kasten S. 55). Im Nachlass von Carl Friedrich Gauß (1777–1855) fand sich ein unveröffentlichtes achtes Kapitel für seine »Disquisitiones arithmeticae« von 1797 und darin eine Theorie, die der von Galois gefundenen sehr ähnlich ist. Erst 1863 machte Richard Dedekind (1831–1916) den Text der Öffentlichkeit zugänglich.

Heute ist die Theorie der endlichen Körper ein wichtiges Werkzeug der Mathematik. Sie spielt selbst in scheinbar entlegenen Gebieten eine Rolle wie etwa in der Theorie der automorphen Funktionen und dem Langlands-Programm, einem größeren Ensemble von Vermutungen, die Algebra, Funktionen- und Zahlentheorie verknüpfen (Spektrum der Wissenschaft 10/2002, S. 98).

Endliche Körper finden sich auch im Kern der modernen Telekommunikation und des Internets, insbesondere bei allem, was mit der Sicherheit des Onlinehandels zu tun hat. Kauft man im Internet ein Buch, eine CD oder einen Fotoapparat, so kommt unweigerlich das Formular, in das man zum Zahlen die Geheimnummer seiner Bank- oder Kreditkarte eingeben muss. Selbstverständlich will der Käufer sicher sein, dass kein Unbefugter Kenntnis von dieser Nummer erlangt – was dieser ja zu seinem Vorteil verwenden könnte. Das ist ein klassisches Problem der Kryptografie: eine Nachricht so zu übermitteln, dass nur der legitime Empfänger sie lesen kann.

Alle bis 1975 bekannten kryptografischen Verfahren, von der historischen Chiffre des Julius Cäsar bis zum heute noch verwendeten Data Encryption Standard (DES), sind symmetrisch: Sender und Empfänger einigen sich auf einen geheimen Kode, der sowohl zum Verschlüsseln als auch zum Entschlüsseln einer Nachricht verwendet wird. Ein derartiges Vorgehen ist für den Onlinehandel ungeeignet, weil eine Internetseite mangels materiellen Kontakts mit dem potenziellen Kunden keine Gelegenheit hat, einen geheimen Kode mit ihm zu vereinbaren. 1976 schlugen die Amerikaner Whitfield Diffie, Martin Hellman und Ralph Merkle jedoch eine neuartige Vorgehensweise vor, die heute als asymmetrische Kryptografie bezeichnet wird (Spektrum der Wissenschaft 10/1979, S. 92).

Bei diesem Schema gibt es zwei Schlüssel: einen, den der potenzielle Empfänger geheimer Nachrichten veröffentlicht, und einen, den er geheim hält. Jeder beliebige Absender kann seine Nachricht mit dem öffentlichen Schlüssel verschlüsseln, und nur der Empfänger kann sie wieder lesbar machen.

Wie können sich Alice (links) und Bob (rechts) über eine unsichere Verbindung, die ein Bösewicht (Mitte) permanent abhört, ein gemeinsames Geheimnis zulegen?

ILLUSTRATIONEN: ISTOCKPHOTO / A-DIGIT [M]

1978 erfanden Ronald Rivest, Adi Shamir und Leonard Adleman am MIT eine Realisierung dieses Prinzips. Das Verfahren wird seither nach den Anfangsbuchstaben der drei Namen als RSA-Protokoll bezeichnet und heute breit verwendet, unter anderem auch in Spielkonsolen.

Mathematisch gesehen ist Verschlüsseln die Anwendung einer umkehrbar eindeutigen Abbildung (Funktion) von der Menge aller denkbaren Zeichenketten – einer festgelegten Länge – auf sich selbst. Entschlüsseln ist die Anwendung der Umkehrfunktion. Diese ist durch die Funktion eindeutig bestimmt und demnach aus ihr berechenbar – im Prinzip. Damit aber ein asymmetrisches Protokoll überhaupt seinen Zweck erfüllt, muss die Verschlüsselungsfunktion einfach anwendbar sein, die Ermittlung der Umkehrfunktion dagegen so mühsam, dass alle Computer und alle Zeit der Welt dafür nicht ausreichen – es sei denn, man verfügt über den geheimen Schlüssel.

Elliptische Kurven

Um ein Funktionenpaar mit solch ungewöhnlichen Eigenschaften zu finden, leisten die Algebra im Allgemeinen und die Theorie der endlichen Körper im Besonderen nützliche Dienste (Spektrum der Wissenschaft 5/1995, S. 46). Mit ihrer Hilfe können zwei Partner das Verfahren von Diffie und Hellman realisieren und sich auf einen geheimen Kode einigen, selbst wenn ein Bösewicht ihre gesamte Kommunikation belauscht.

Hierzu wählen unsere beiden Freunde – man nennt sie traditionell Alice und Bob – einen endlichen Körper mit q Elementen sowie eine primitive Wurzel x, also ein Element des Körpers mit der Eigenschaft, dass die Folge $0, 1, x, x^2, x^3, ..., x^{q-2}$ alle Elemente des Körpers liefert. Alice und Bob wählen dann jeder für sich und im Geheimen eine Zahl zwischen 1 und $q-1$. Nennen wir die Zahl, die Alice gewählt hat, a und Bobs Wahl b. Alice teilt dann Bob den Wert x^a mit, während Bob seiner Partnerin den Wert x^b übermittelt. Auch für sehr große a lässt sich die Potenz x^a sehr schnell berechnen (Kasten S. 56 oben). Anschließend berechnet Alice $(x^b)^a$ und Bob $(x^a)^b$. Somit haben beide das Element x^{ab} berechnet: ihr gemeinsames Geheimnis (Grafik S. 58).

Stellen wir uns vor, ein Bösewicht habe den gesamten Austausch zwischen Alice und Bob abgehört; folglich kennt er x, x^a und x^b. Die Sicherheit des Systems beruht darauf, dass niemand weiß, wie man aus diesen Angaben effizient x^{ab} berechnen kann. Dafür würde genügen, wenn der Abhörer a aus x^a ermitteln könnte. Das nennt man das »Problem des diskreten Logarithmus«, denn unter den gewöhnlichen Zahlen wäre a der Logarithmus von x^a zur Basis x. Man könnte nacheinander die Potenzen x^2, x^3 ... berechnen, bis sich der Wert x^a ergibt. Aber für hinreichend große a besteht keine Hoffnung, a auf diesem Weg zu finden, bevor unsere Sonne erlischt.

Es gibt allerdings etwas geschicktere Verfahren. Damit das System auch ihnen standhält, muss $q-1$ mindestens einen sehr großen Primfaktor enthalten.

Man gewinnt noch etwas mehr an Eleganz und Sicherheit, wenn man von endlichen Körpern zu komplizierteren, aber nach wie vor endlichen algebraischen Strukturen übergeht. Es handelt sich um elliptische Kurven über einem endlichen Körper (Bilder S. 53 und S. 57, Kasten S. 56; siehe auch SdW 1/2009, S. 62). Man geht von einem hinreichend großen endlichen Körper F aus. Dann definiert man durch eine Gleichung, deren Koeffizienten aus F stammen, eine elliptische Kurve, genauer gesagt eine Menge von Punkten oder auch Paaren von Zahlen aus F. Das Interessante an diesen Kurven ist, dass man für ihre Punkte eine Addition definieren kann. Wie oben wählen Alice und Bob zwei natürliche Zahlen a und b und berechnen zu einem vorgegebenen Punkt P der elliptischen Kurve den Wert aP (Alice) beziehungsweise bP (Bob); ihr gemeinsames Geheimnis ist dann der Punkt $(ab)P$ der Kurve.

Derartige Protokolle finden sich in allen modernen Telekommunikationssystemen; sie belegen die Aktualität des Werks von Galois. Sein Erbe geht jedoch über die Kryptografie und die Verschlüsselung von Daten weit hinaus. Was man heute Galois-Theorie nennt, ist ein komplexes Gebäude, dem ein beachtlicher Teil der modernen mathematischen Forschung Anregungen verdankt: von der Zahlentheorie bis hin zu den Differenzialgleichungen über die algebraische Geometrie und das Langlands-Programm, dessen Nebenprodukt der Beweis des berühmten fermatschen Satzes ist.

DER AUTOR

Antoine Chambert-Loir ist Professor für Mathematik an der Université de Rennes.

QUELLEN

Bewersdorff, J.: Algebra für Einsteiger: Von der Gleichungsauflösung zur Galois-Theorie. Vieweg+Teubner, Wiesbaden 2007

Ehrhardt, C.: Évariste Galois. La fabrication d'une icône mathématique. Éditions de l'École Pratique des Hautes Etudes en Sciences Sociales, Paris 2011

Pesic, P.: Abels Beweis. Springer, Berlin 2005

WEBLINKS

www.galois-group.net/galois.pdf
Bernd Klein (www.bklein.de): Evariste Galois oder das tragische Scheitern eines Genies. Biografie, 132 Seiten

http://de.wikiversity.org/wiki/Kurs:K%C3%B6rper-_und_Galoistheorie_%28Osnabr%C3%BCck_2011%29
Holger Brenner: Vorlesung über Körper- und Galoistheorie (Osnabrück 2011)

http://fr.wikisource.org/wiki/Œuvres_mathématiques/5
Évariste Galois: Sur la théorie des nombres. 1830. Neu gesetzte Originalarbeit

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1142720**

herrenhäuser FORUM

Mensch-Natur-Technik

Gibt es eine Klimaformel?
Wie verlässlich sind Klimamodelle?
Können wir das Klima der Zukunft errechnen?

MI 11.04.2012 / 19.00 / HANNOVER

KLIMAMODELLE–

Wie berechenbar ist die Zukunft?

MIT **Prof. Dr. Mojib Latif** Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel, **Dr. Gabriele Gramelsberger** Freie Universität Berlin, **Dr. Paul Becker** Deutscher Wetterdienst, **Dr. Thorsten Mauritsen** Max-Planck-Institut für Meteorologie
MODERIERT VON **Dr. Reinhard Breuer** Editor-at-Large Spektrum der Wissenschaft

VERANSTALTUNGSORT Kleiner Sendesaal, NDR Landesfunkhaus Niedersachsen, Hannover
ANMELDUNG forum@volkswagenstiftung.de
MEHR INFOS www.spektrum.de/mnt

Eine Veranstaltungsreihe von

HERRENHAUSEN

VolkswagenStiftung

Spektrum DER WISSENSCHAFT

STADTPLANUNG

Die smarte Stadt der Zukunft

Um den Verkehr oder das Müllmanagement zu optimieren, benötigt jede Stadtverwaltung Informationen. Smartphones und andere Kommunikationsmittel bieten dabei in vielen Fällen Vorteile gegenüber Sensoren – und soziale Netzwerke fördern sogar die Kreativität der Bürger.

Von Carlo Ratti und Anthony Townsend

Am 6. Januar 2011 wurde der tunesische Blogger Slim Amamou als Regimekritiker verhaftet. Doch über das soziale Netzwerk »Foursquare« informierte er Freunde und Journalisten. Foursquare basiert auf einer Applikation, kurz: App, für Mobiltelefone. Weil es den im Gerät eingebauten GPS-Sensor nutzt, um dem Netzwerk beim Log-in automatisch den Standort zu melden, konnte Amamou im Gefängnis von Tunis geortet werden. Die Festnahme fand weltweit ihren Nachhall in der Presse – und entfachte weitere Aufstände. So trug die Generation Internet dazu bei, dass Präsident Zine el-Abidine Ben Ali acht Tage später nach Saudi-Arabien floh.

Keine zwei Wochen darauf entbrannten auch auf Kairos Straßen die Proteste gegen das dort herrschende Regime. Wieder kam den modernen Kommunikationsmedien eine wichtige Rolle zu. Zwar ließ die Regierung alsbald sowohl den Internetservice als auch das Mobilfunknetz des Landes außer Betrieb nehmen. Doch via Facebook, Twitter und Chatrooms hatten sich bereits Millionen Menschen miteinander solidarisiert. Weil die Wirtschaft des Landes Schaden zu nehmen drohte, wurden die Medien wieder frei gegeben. Die Massenproteste hielten an, Präsident Hosni Mubarak dankte am 11. Februar ab.

Soziale Netzwerke, Internet und Handys schaffen offenbar bereits heute Rahmenbedingungen, unter denen urbane Gesellschaften ihre Lebenswelten verändern. Viele Stadtplaner beschränken sich jedoch in ihren Konzepten von »Smart Citys« – mit informationsverarbeitenden Technologien ausgestatteten Städten – auf die Optimierung einzelner Prozesse. Als Flaggschiff solcher Projekte kann Masdar in den Vereinigten Arabischen Emiraten gelten, eine für 50 000 Bewohner aus der Wüste gestampfte Stadt. Dort ist jedes Gebäude und Fahrzeug, ja sogar jede Straßenlaterne mit Hightechzubehör ausgestattet, um den Energieverbrauch auf ein Minimum zu reduzieren. Das Gleiche gilt für New Songdo City in Südkorea und PlanIT Valley in Portugal.

Solche von Planern, IT-Firmen und Behörden strukturierten und somit den Bürgern aufgezwungenen »Top-down«-Konzepte sind jedoch problematisch. Nach fünf Jahren und mehr als einer Milliarde Dollar Kosten wird beispielsweise Masdar bereits neu überdacht. Wirklich smarte Städte sollten einem Vogel- oder Fischschwarm gleichen, in dem jedes Individuum auf subtile Weise auf seine Nachbarn reagiert. Hunderttausende von Menschen erstritten auf Kairos Tahrir-Platz nicht deshalb eine Veränderung, weil ihnen das von einem Team von »Demokratieplanern« verordnet worden wäre, sondern weil Freunde und Bekannte sie via SMS und Twitter dorthin gerufen haben. Die beste Option, urbane Zentren zukunftsfähig zu machen, ist demnach ein Bottom-up-Ansatz. Wie immer die Ziele lauten, ob »Nachhaltigkeit in der Energieversorgung« oder »weniger Staus« – mit der richtigen technischen Unterstützung könnten die Stadtbewohner effektiver dazu beitragen als bei zentralisierten Konzepten. Mehr noch: Durch virtuelle soziale Netzwerke entstünde eine neue Form realer Geselligkeit und urbaner Kreativität.

Tatsächlich genießen Smart Citys derzeit hohe Aufmerksamkeit. Der IT-Konzern IBM prognostiziert weltweit einen Zehn-Milliarden-Dollar-Markt auf diesem Gebiet bis zum Jahr 2015. Ein wenig erinnert das an die Veränderungen im Formel-1-Geschäft vor zwei Jahrzehnten. War der Erfolg auf der Rennstrecke bis dahin vorwiegend von der Mechanik des Autos und den Fähigkeiten des Fahrers abhängig, wurden die Boliden nun in regelrechte Computer verwandelt, die in Echtzeit die Informationen einer Vielzahl von Sensoren ver-

AUF EINEN BLICK

URBANE NETZWERKE

1 **Der Siegeszug moderner Kommunikationsgeräte** wie Smartphones eröffnet ungeahnte Möglichkeiten für die Stadtplanung.

2 **Die »smarte Stadt der Zukunft«** baut auf die Vernetzung von Mensch und Technik, um effizienter, innovativer und auch lebendiger zu werden.

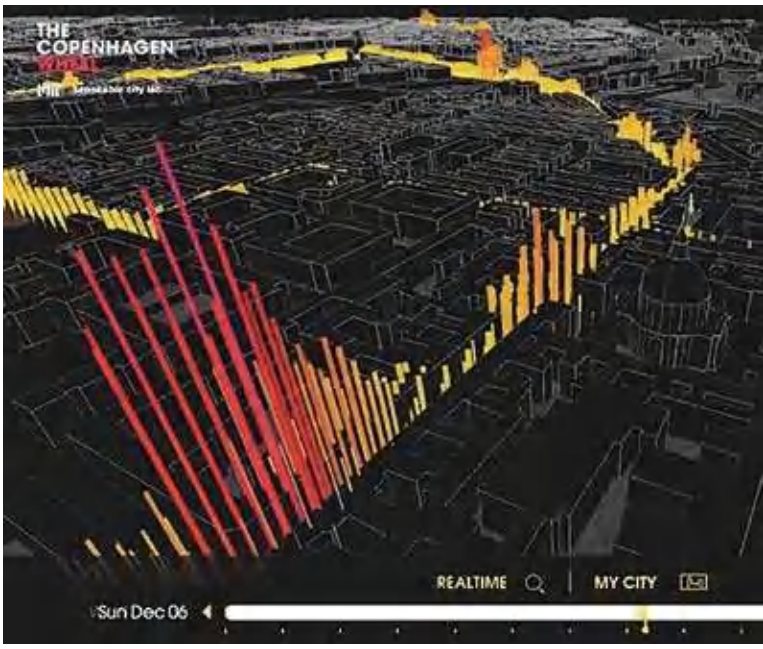
3 Um die **Bürger möglichst effektiv in die urbanen Prozesse einzubinden**, sollten die Planer Bottom-up-Ansätze verfolgen.

Großstädte wie New York sind eine Ressource für Innovationen – vorausgesetzt, die Kreativität der Bürger wird geweckt. Ein Beispiel sind die »BigApp Challenges«, ein Wettbewerb um die besten Ideen, durch Smartphone-Apps das Leben in der Stadt angenehmer zu gestalten.

ISTOCKPHOTO / PAWEL GAUL

arbeiteten, um das Fahrzeug den Bedingungen des Rennens ständig neu anzupassen.

Seit dem letzten Jahrzehnt durchdringen digitale Technologien auch unsere Städte. Breitbandnetze und Mobilfunkstationen verbinden Handys, Smartphones und Tablet-PCs, die zudem erschwinglicher werden. Datenbanken bieten Informationen, die oft von öffentlichen Displays abrufbar sind. Hinzu kommt ein stetig wachsendes Netzwerk von Sensoren, mit denen beispielsweise Verkehrsströme oder die Luftverschmutzung erfasst werden können.



CHRISTINE OUTRAM UND XIAOJI CHEN

Dem Müll auf der Spur

Die riesige Datenmenge, die dadurch entsteht, bildet die Grundlage einer »Programmierung der Infrastruktur«. In Stockholm nehmen Kameras automatisch die Nummernschilder der Autos auf, die ins Stadtzentrum fahren; die Halter werden ermittelt und ihre Konten je nach Tageszeit belastet, mit maximal 60 Kronen (knapp sieben Euro) pro Tag. Das hat die Zahl der Fahrten durch die Innenstadt reduziert und damit die Stauzeiten um 50 Prozent, die umweltrelevanten Emissionen um 15 Prozent gesenkt.

Drei Projekte, die vom SENSEable City Laboratory am Massachusetts Institute of Technology in Boston entwickelt wurden, zeigen weitere Möglichkeiten auf. »Trash Track« soll den Weg des Mülls durch das Abfallsystem einer Stadt auskundschaften, um die Entsorgungskette zu optimieren. Dazu erhalten Abfallstücke elektronische Labels, die Informationen an das Mobilfunknetz senden. In einem in Seattle durchgeführten Test verfolgte das Labor so den Weg von mehr als 2000 solcher Markierungen an Wiederverwertbarem ebenso wie an Sondermüll und Elektrogeräten. Einige der Objekte reisten quer durch die Vereinigten Staaten! Den Rekord stellte eine Druckerpatrone auf, die 6152 Kilometer bis zur Entsorgung zurücklegte. Zudem endeten nicht alle Labels an legalen Endpunkten. Die Ergebnisse zeigten Möglichkeiten auf, die mit dem Transport einhergehenden Kohlendioxidemissionen zu verringern. Seattle könnte die Informationen dazu nutzen, um seine Bürger stärker zum Recycling beziehungsweise zur sachgerechten Entsorgung anzuregen.

Zum Klimagipfel 2009 in Kopenhagen entwickelte das Labor das »Copenhagen Wheel« (Bild oben rechts), mit dem sich Fahrräder zum intelligenten E-Bike aufrüsten lassen. Der Einbau am Hinterrad speichert nämlich nicht nur die beim Bremsen sonst verlorene Energie in einem Akku und treibt damit einen Elektromotor an. Es registriert auch über Sensoren Daten zu Luftverschmutzung, Temperatur und Feuchtigkeit. Via Smartphone können diese weitergesendet oder spä-

PICTURE ALLIANCE / ZUMA PRESS

Die Massenproteste auf dem Tahrir-Platz in Kairo machten 2011 offenbar, wie stark moderne Kommunikationstechnologien das Leben bereits verändert haben: Soziale Netzwerke und Handys ersetzten eine zentrale Organisation der Proteste.

MIT SENSEABLE CITY LAB / MAX TOMASINELLI

Das »Copenhagen Wheel« (rote Scheibe) enthält einen Elektroantrieb und diverse Sensoren. Damit werden etwa die Stickoxidemissionen (links) in der dänischen Hauptstadt gemessen.

ter ausgewertet werden, um die tägliche Radstrecke zu optimieren. Über Handy lässt sich das Bike auch abschließen.

Das dritte Projekt, LIVE Singapore, benutzt die von der Myriade an Kommunikationswerkzeugen, Mikrokontrollern und Sensoren aufgezeichneten Echtzeitdaten, um den Puls einer Stadt von Moment zu Moment zu erfassen. Eine für alle zugängliche Software ermöglicht es sämtlichen Bürgern, Apps zu entwickeln, welche diese Daten auswerten. Derzeit entsteht beispielsweise ein Informationssystem für Berufspendler, das ihren Heimweg verkürzen soll; eine Analysewerkzeug zur Senkung des Energieverbrauchs und eine elektronische Hilfe, ein Taxi zu bekommen, wenn wieder mal ein Regensturm über die Insel zieht. Das Potenzial smarter Infrastruktur ist gewaltig. Es verwundert daher nicht, dass viele große Konzerne wie etwa IBM, Cisco Systems, Siemens, Accenture, Ferrovial und ABB ihr Augenmerk auf den städtischen Raum richten.

Planungsziel: Die lebendige Stadt

Doch die Gefahr ist groß, dass sie vor allem in Top-down-Konzepte investieren. Denn Wert und Bedeutung einer Stadt lassen sich nicht allein an ihrer Effizienz und auch nicht nur an ihrer Nachhaltigkeit bemessen, sondern vielmehr am Grad der »Sociability«. Der schwer ins Deutsche zu übersetzende Begriff umschreibt die Lebendigkeit eines sozialen Systems. Und selbst wenn es Bauwerke von Stararchitekten sind, die unser Bild von Metropolen prägen – man denke etwa an den Eiffelturm in Paris oder das Empire State Building in New York –, sind Straßen und Stadtteile doch das Werk gewöhnlicher Menschen. Der Städtebau ist ein dezentraler Prozess, bei dem aus einer kollektiven Anstrengung kommunale Architektur entsteht.

Dieses organische Wachstum klassischer Metropolen sollten die Planer smarter Städte bedenken. Wer der künftigen Gemeinschaft ein starres Design aufzwingt, scheitert oft dabei, ihre Bedürfnisse zu erfüllen, ihre Kultur widerzuspiegeln und jene Vielfalt an Aktivitäten und Angeboten zu ermöglichen, die das Leben in gewachsenen Städten so attraktiv macht. Auch so manches Projekt, ein smartes Haus zu kreieren, misslang, weil die Entwickler falsche Annahmen darüber machten, wie die Bewohner die angebotenen Technologien im Alltag nutzen wollen – eine Anpassung der Konfiguration an das reale Leben hatten sie nicht vorgesehen.

Top-down-Visionen vernachlässigen überdies das innovative Potenzial der Menschen. Nehmen wir etwa die Flut von Ideen, die Wettbewerbe wie die »BigApp Challenges« der Stadt New York hervorbringen, bei dem die zehn besten Vorschläge für urbane Apps ausgezeichnet werden. 2011 gehörten zu den Siegerideen: eine farbkodierte Karte der Parkmöglichkeiten, eine Sammlung von Freiwilligeninitiativen, eine Datenbank zu Fahrradunfällen, um sichere Radrouten zu entwerfen. Verglichen damit nehmen sich Versprechungen über die Vorteile von Videokonferenzen in New Songdo City deutlich schwächer aus.

Ein ausschließlicher Fokus auf effiziente Abläufe ignoriert fundamentale bürgerliche Ziele wie Lebensqualität, Demokratie und Rechtsstaatlichkeit. Sociability durch Technik zu fördern hingegen trifft diese Anforderungen – und eröffnet gleichzeitig neue Herangehensweisen an die Effizienz. Ein Beispiel unter vielen: die Smartphone-App »Dopplr«, eine Art Tagebuch und Planungswerkzeug für Fernreisende. Weil alle Einträge für einen vom Nutzer bestimmten Personenkreis einsehbar sind, können sich Bekannte an einem Ort ver-

MIT FRDL. GEN. VON DIGITAL WATER PAVILLION / CARLO RATTI ASSOCIATI

Ein Beispiel für reaktionsfähige Architektur: Sensoren und Regler des digitalen Wasserpavillons auf dem Gelände der Expo 2008 im spanischen Saragossa registrieren, wenn sich Fußgänger nähern (im Foto links einer der Autoren, Carlo Ratti) – und stellen selektiv den Wasservorhang ab, der das Kennzeichen des Pavillons ist. Computergesteuerte Düsen und Lichter zaubern außerdem Muster und Texturen auf die nasse Leinwand, auch das in Reaktion auf das Publikum (rechts).

abreden und einander etwa Reisetipps geben. Und da das Programm auch die durch eine Reise verursachten Kohlendioxidemission abschätzt, besteht die Möglichkeit, dass soziale Interaktion ein umweltfreundlicheres Verhalten fördert.

Wie ließe sich also eine Smart City entwerfen, bei der die Förderung der Sociability Vorrang hat? Ein idealer Anfang ist es, die wachsende Zahl von Smartphones zum Vorteil der Gemeinschaft zu nutzen: indem ihre Besitzer als Sensoren fungieren. Die Verkehrsfunktion auf Google Maps ist ein gutes Beispiel dafür. Anstatt ein teures Netzwerk von Messfühlern entlang der Straßen zu installieren, fragt Google permanent den Standort von Mobilfunkgeräten ab, die einer Schar von Freiwilligen gehören. Daraus berechnen Computer, wo der Verkehr gut fließt, wo es nur langsam vorangeht oder sich gar staut. Diese Information wird via App an Autofahrer weitergegeben – als farbig kodierte Verkehrsgeschwindigkeit, als Angabe zur geschätzten Fahrzeit beziehungsweise der sich ergebenden Verzögerungen oder durch den Vorschlag alternativer Routen.

Google ist sicher keine Bottom-up-Plattform, doch dieser Service illustriert, wie Sensordatenteilung das Management einer urbanen Infrastruktur unterstützen kann. Jeder Nutzer sucht sich die beste Strecke auf Grund der Beobachtungen einer Gruppe.

Freilich bedarf es nicht mobiler Alleskönner im Handyformat, um Bottom-up-Ansätze zu realisieren. 2009 verteilten das Green Watch Project und die Internetfirma Fing in Paris insgesamt 200 Geräte, die lediglich den Ozongehalt der Luft sowie den Geräuschpegel bestimmten, während die Projektteilnehmer ihren Beschäftigungen nachgingen und die Daten weitersandten: Diese wurden über das Kartensystem Citypulse veröffentlicht. Zuvor hatte die Metropole Paris weniger als ein Dutzend Ozonmessstationen betrieben. Im ersten Versuch kamen in einem einzigen Stadtteil mehr als 130 000 Messungen zusammen – und zwar zu einem Bruchteil der Kosten fester Installationen. Das Experiment zeigte auch, dass sich die Bürger in Umweltfragen gern engagieren. Zukünftig könnten Sensoren für solche Basisnetzwerke in diverse Alltagsobjekte eingebaut werden, selbst in Kleidungsstücke.

> Eine von der Basis aus errichtete smarte Stadt bleibt **stets eine Baustelle**, ein chaotisches Labor für urbane Innovationen

Und es geht noch ein ganzes Stück einfacher. Heute haben viele Gemeinden in den Vereinigten Staaten unter der Nummer 311 Telefonhotlines eingerichtet, die Bürger schnellen Zugang zu Informationen und Dienstleistungen der Stadtverwaltungen geben sowie die Möglichkeit, Meldungen zu erstatten. Diese sind dann über eine entsprechende App auch anderen zugänglich. Zum Beispiel reagierte ein Bewohner Bostons über eine 311-App namens »Citizen's Connect«

MIT FRDL GEN VON DIGITAL WATER PAVILLION / MAX TOMASINELLI

auf den Hilferuf eines anderen Bewohners, dem ein streunendes Opossum in die Mülltonne geraten war. Er konnte das Tier innerhalb einer halben Stunde befreien – lange bevor städtische Angestellte auch nur eine Antwort auf den Hilferuf geschickt hatten – und hinterließ im 311-System die Information, dass die Angelegenheit erledigt sei. Solche Werkzeuge werden sich zu wikiähnlichen Informationsspeichern entwickeln, die es Bürgern ermöglichen, sich zu organisieren und gegenseitig zu helfen. Freilich dürfen die Verwaltungen dies nicht als Möglichkeit ansehen, ihre Verpflichtungen abzugeben und Kosten zu sparen. Aber selbst dagegen ist ein smartes Kraut gewachsen: Internetnachrichtenseiten wie »EveryBlock« berichten über lokale Themen und überwachen Verwaltungen viel genauer als Zeitungen oder Fernsehen.

Bottom-up-Verfahren nutzen überdies die Sociability als Hebel, um Aktivitätsmuster zu ändern. Das anfangs erwähnte soziale Netzwerk »Foursquare« kann beispielsweise das Ausgehen zu einer Art urbanem Spiel machen: Es weiß, wer ein Café, eine Bar oder ein Restaurant am häufigsten besucht, und verleiht ihm einen Ehrentitel (Mayor). Derart öffentlich gemachte Personen geben dem Netzwerk einen persönlichen Anstrich, ohne den selbst eine Hightechstadt nicht auskommt.

Das lässt sich auch auf andere Art unterstützen – durch Technik, die auf den Menschen reagiert. Ein prominentes Beispiel ist der digitale Wasserpavillon auf dem Gelände der Expo 2008 in Saragossa (Spanien). Seine »Wände« bestehen aus Wasservorhängen, die aus mehr als 3000 computergesteuerten Düsen gespeist werden. Sensoren melden die Gegenwart von Menschen, und das Gebilde verändert sich: Ein Durchgang in das Gebäude wird frei gegeben, Muster und Bilder entstehen.

Neuartige Computerschnittstellen werden auch Menschen unterstützen, die sich mit Technik schwertun. So hat etwa das Institute for Creative Technologies der University of Southern California in Los Angeles ein gestengesteuertes Eingabegerät für das Programm Googlemail entwickelt, das zusammen mit Sprachsynthese- und -erkennungsprogrammen auch Analphabeten, Älteren und Behinderten die Benutzung eines E-Mail-Programms und des Internets ermöglichen könnte. Bleibt abzuwarten, welche Impulse solche Technologien auslösen, wenn sie dereinst in den Armenvierteln der großen Metropolen zur Verfügung stehen, wie etwa in den mehr als 600 Internetcafés der Pontos de Cultura (Kulturtreffpunkte) in den Favelas Brasiliens.

Obwohl Top-down-Konzepte wie Masdar zu einseitig ausgerichtet sind, zeichnet sie doch eines aus: Ihr Ziel ist klar definiert. Eine von der Basis aus errichtete smarte Stadt hingegen bleibt stets eine Baustelle, ein chaotisches Labor für urbane Innovationen. Es fehlt noch an Methoden zu Analyse und Evaluation. An dieser Stelle können Architekten, Planer und Technologen effektiv bei der Gestaltung smarter Städte mitwirken – indem sie die Ingenieursressourcen mit den Aktivitäten der Basis abstimmen. Die Stadtverwaltungen von New York City, London, Singapur und Paris unternehmen gerade die ersten vorsichtigen Schritte in diese Richtung, indem sie ihre Datenbanken öffentlich zugänglich machen. Damit können auch Unternehmern Apps anbieten, die diese Informationsquellen nutzen, um die Bedürfnisse der Bürger zu befriedigen.

Denn schließlich ist es Aufgabe einer Administration, auf ihre Bürger zu hören und mit ihnen zusammen Visionen zu entwickeln. Zwar führen manche Experimente zu Musterlösungen für alle, doch jede Gemeinde hat einzigartige Bedingungen und Ressourcen. ~

DIE AUTOREN

Carlo Ratti (links) ist Architekt, Ingenieur und Leiter des SENSEable City Laboratory am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge, USA. Er arbeitet als Architekt und Städtedesigner in Turin, Italien. **Anthony Townsend** ist Forschungsleiter am Institute for the Future in Palo Alto, Kalifornien, einer Ideenschmiede, die strategische Voraussagen und Szenarien entwickelt.

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1142721**

Katja Gaschler, Anna Buchheim (Hg.)

KINDER BRAUCHEN NÄHE

Sichere Bindungen aufbauen und erhalten

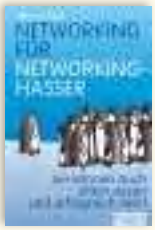
2011, 120 S., ca. 20 Abb., kart., Schattauer

Bestell-Nr. 3468

€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Dieses Buch ist kein Erziehungsratgeber im üblichen Sinn. Vielmehr präsentiert es wichtige Ergebnisse der Bindungsforschung und leitet daraus ab, wie sich eine vertrauensvolle Beziehung zu Kindern aufbauen lässt. Denn eine sichere Bindung ist nicht nur entscheidend für eine gelingende Erziehung. Sie fördert auch nachweislich die seelische Gesundheit und den sozialen Erfolg im späteren Leben.

Vor diesem Hintergrund bietet *Kinder brauchen Nähe* profunde Einblicke in Themen wie kindliche Schlafprobleme, Schreibabys, Trotzverhalten und Scheidungskinder. Pädagogen, Psychologen und Psychotherapeuten zeigen in forschungsbasierten und zugleich unterhaltsamen Beiträgen, wie prägend die Qualität der Bindungen eines Kindes für seine Entwicklung ist.



Devora Zack

NETWORKING FÜR NETWORKING-HASSER

Sie können auch allein essen und erfolgreich sein!

2012, 170 S., geb., Gabal

Bestell-Nr. 3527

€ 24,90 (D), € 25,60 (A)

Gehören Sie auch zu den Menschen, die lieber ruhige Face-to-face-Unterhaltungen mögen statt turbulente Massenevents? Devora Zack nimmt sich der »verstaubten alten Regeln« des Networkings an und stellt sie auf den Kopf. Niemand muss zum leutseligen Extrovertierten mutieren, um erfolgreicher Networker zu sein. Mit viel Humor und Sachverstand vermittelt das Buch, wie exakt die Eigenschaften, die uns zu Networking-Hassern machen, uns helfen können, Networking zu betreiben, das unserem Temperament entspricht.

Bestellen Sie direkt: +49 6221 9126-841 @ info@science-shop.de

Christoph Burger

KARRIERE OHNE SCHLEIMSPUR

Wie Sie Charakter zeigen und trotzdem Erfolg haben

2012, 184 S., kart., Linde

Bestell-Nr. 3528

€ 19,90 (D), € 19,90 (A)

Karriere – das hieß früher: Aufstieg um jeden Preis. Heute geht es für viele kompetente Fach- und Führungskräfte jedoch darum, erfolgreich zu sein, ohne sich dafür zu verbiegen. Sie wollen sich treu bleiben und ihre Persönlichkeit auch im Job einbringen. Doch in vielen Unternehmen gelten noch immer die klassischen Gesetze der Karrieremechanik. Welche Lösungen sind praktikabel? Dieses Buch zeigt, wie engagierte Menschen ihren eigenen Kopf bewahren, das ideale Unternehmen für sich finden und beruflich erfolgreich sind.

Robert Yarham

LANDSCHAFTEN LESEN

Die Formen der Erdoberfläche erkennen und verstehen

2012, 256 S. m. zahlr. farb. Abb., geb., Haupt

Bestell-Nr. 3529

€ 24,90 (D), € 25,60 (A)

Anhand sorgfältig ausgewählter Fotos und Illustrationen erklärt dieses reich illustrierte Buch die Entwicklung der Landschaften und die Entstehung ihrer Formen. Dieser nützliche Reisebegleiter unterstützt beim »Lesen« der Landschaft, zeigt, wie das, was wir in der Landschaft sehen, zu deuten ist und erklärt die wichtigsten Prozesse, die die Landschaftsformen vor unseren Augen geschaffen haben.

Immanuel Birmelin

VON WEGEN SPATZENHIRN!

Die erstaunlichen Fähigkeiten der Vögel

2012, 204 S. m. 45 Farbabb., geb., Kosmos

Bestell-Nr. 3530

€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Ihr Gehirn ist nicht größer als eine Nuss, und dennoch sind ihre geistigen Fähigkeiten mit denen von Schimpansen oder Walen vergleichbar. Krähen tricksen ihre Artgenossen bewusst aus, um sich den größten Futteranteil zu sichern. Und Kohlmeisen verstehen und lösen komplizierte Aufgaben schneller als Hund und Katze. Mit Respekt, Witz und Bewunderung berichtet der bekannte Verhaltensforscher von den geistigen Glanzleistungen der Vögel.

Werner Kinnebrock

WAS MACHT DIE ZEIT, WENN SIE VERGEHT?

Wie die Wissenschaft die Zeit erklärt

2012, 160 S. mit 4 Abb. u. 2 Tab., kart., Beck

Bestell-Nr. 3531

€ 12,95 (D), € 13,40 (A)

»Was macht die Zeit, wenn sie vergeht?« Diese Frage stellte der Physiker Albert Einstein dem Mathematiker Kurt Gödel. Für Werner Kinnebrock, selbst Mathematiker, war sie der Anlass, ein wunderbar verständliches Buch über dieses faszinierende Phänomen zu schreiben.

Patrick Wyse Jackson

PALÄONTOLOGIE FÜR NEUGIERIGE

Was Sie schon immer über Fossilien, Erdgeschichte und Evolution wissen wollten

2012, 100 S. m. 60 Farbabb., geb., Primus Verlag

Bestell-Nr. 3532 € 19,90 (D), € 20,50 (A)

Eine kompakte Einführung in die Paläontologie!

Patrick Wyse Jackson erklärt anschaulich, wie und warum Fossilien erhalten blieben, wie sie klassifiziert werden und welche Informationen sie über die Geschichte der Erde liefern.

Die großen Fragen **behandeln grundlegende Probleme und Konzepte in Wissenschaft und Philosophie. Anspruch der ambitionierten Reihe ist es, die Antworten auf diese Fragen zu präsentieren und damit die wichtigsten Gedanken der Menschheit in einzigartigen Übersichten zu bündeln.**

Tony Crilly

DIE GROSSEN FRAGEN: MATHEMATIK

2012, 208 S. m. 70 Abb. u. 14 Tab., geb., Spektrum Akademischer Verlag

Bestell-Nr. 3516

€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Im Band *Mathematik,* der einen Bogen spannt vom Beginn des Zählens und den idealen platonischen Körpern bis zur Chaostheorie und dem fermatschen Theorem, setzt sich Crilly mit den 20 Fragen auseinander, die das Herz der Mathematik und unseres Verständnisses der Welt bilden.

Stuart Clark

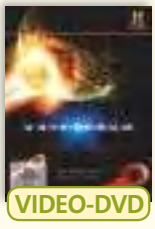
DIE GROSSEN FRAGEN: UNIVERSUM

2012, 208 S. m. 15 Abb., geb., Spektrum Akademischer Verlag

Bestell-Nr. 3517

€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Im Band *Universum* geht Clark den 20 entscheidenden Fragen der Astronomie, Kosmologie und letztlich unserer Existenz nach.



Mit Michael Mosley

UNSER UNIVERSUM – DIE KOMPLETTE FÜNFTE STAFFEL, 3 VIDEO-DVDS

2012, Laufzeit 360 Min., INFO-Programm gem. § 14 JuSchG., Polyband

Bestell-Nr. 3511

€ 34,– (D), € 34,– (A)

Eine faszinierende und bildgewaltige Entdeckungsreise zu den Geheimnissen unseres Universums!

Mit Hilfe aktuellster wissenschaftlicher Erkenntnisse und Computeranimationen der neuesten Generation nähert sich diese packende HISTORY-Dokumentation der fantastischen Welt der kosmischen Rätsel. Denn schließlich liegen in den vielen unbeantworteten Fragen nicht nur Erkenntnisse über den Ursprung der Menschheit, sondern auch der Schlüssel für unsere Zukunft.

Mit Michael Mosley

DIE GROSSEN FRAGEN DER WISSENSCHAFT – MACHT, BEWEISE UND LEIDENSCHAFT, 2 VIDEO-DVDS

2012, Laufzeit: 360 Min., INFO-Progr. gem. § 14 JuSchG., Deutsch/Englisch, Polyband

Bestell-Nr. 3500 € 19,90 (D), € 19,90 (A)

Einige Fragen faszinieren und beschäftigen uns seit Beginn der Menschheit: • Was ist da draußen? • Woraus besteht die Welt? • Wie sind wir hierhergekommen? • Besitzen wir grenzenlose Kraft? • Was ist das Geheimnis des Lebens? • Was macht uns zu Menschen?

Für Bestellungen außerhalb Deutschlands und Österreichs berechnen wir € 3,50 Versandkosten. Alle Preise inkl. Umsatzsteuer. Preise unter Vorbehalt. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH

Neu im Frühjahr 2012

Science-Shop.de

Neuheiten
Schnäppchen*
Science & Fun

SCIENCE-SHOP
SPEZIAL 2/2012

* Lieferung, solange Vorrat reicht

Joanne Baker

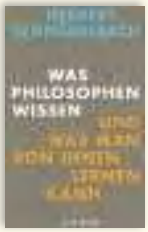
50 SCHLÜSSELIDEEN ASTRONOMIE UND KOSMOLOGIE

2012, 208 S. m. 55 Abb., geb., Spektrum

Bestell-Nr. 3512 **€ 24,95 (D),** **€ 25,70 (A)**

Eine Entdeckungsreise durch unser Universum vom Urknall bis zur Astrobiologie. In *50 Schlüsselideen Astronomie und Kosmologie* erklärt Joanne Baker klar und prägnant die wichtigen Konzepte, großen Entdeckungen und neuesten Theorien der Astronomen und Astrophysiker.

Weitere Bände der Reihe »50 Schlüsselideen« finden Sie hier:
www.science-shop.de/schluesselideen



Herbert Schnädelbach

WAS PHILOSOPHEN WISSEN

und was man von ihnen lernen kann

2012, 237 S., geb., C.H. Beck

Bestell-Nr. 3523
€ 19,95 (D), **€ 20,60 (A)**

Ein brillanter Grundkurs in Philosophie – für Einsteiger und Fortgeschrittene!

Herbert Schnädelbach demonstriert in 14 Kapiteln exemplarisch, was in der gegenwärtigen Philosophie verbindlich gelehrt und gelernt werden kann. »Philosophisches Wissen« ist kein leeres Wort. Ungeachtet mancher Zweifel wissen Philosophen wirklich etwas; sie verfügen über einen Kernbestand wissenschaftlichen Wissens, der wenig umstritten ist und hinter dessen Einsichten nicht zurückfallen darf, wer heute nach den Regeln des Fachs philosophiert.

Bestellen Sie direkt: **+49 6221 9126-841** **info@science-shop.de**

Brian Greene

DIE VERBORGENE WIRKLICHKEIT

Paralleluniversen und die Gesetze des Kosmos

2012, 500 S. m. Abb., geb., Siedler

Bestell-Nr. 3488
€ 24,99 (D), **€ 25,70 (A)**

Der Physiker und Bestsellerautor Brian Greene macht sich auf die Suche nach der »verborgenen Wirklichkeit« im Universum. Er zeigt, warum vieles dafür spricht, dass wir im weiten Kosmos nicht allein sind, und beschreibt, welchen Parallelwelten Astrophysiker auf der Spur sind.

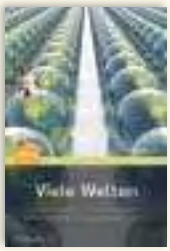
Ingrid Hilgert, Joachim Hilgert

MATHEMATIK – EIN REISEFÜHRER

2012, VII, 273 S. m. Abb., kart., Spektrum

Bestell-Nr. 3524
€ 24,95 (D), **€ 25,70 (A)**

Dieses Buch versteht sich als Reiseführer in das Land der Mathematik. Es informiert unter anderem über die Regionen dieses Landes (Algebra, Geometrie, Analysis, Stochastik, ...), über seine Geschichte, bedeutende Krisen und Entwicklungslinien, Beziehung zu benachbarten Gebieten, Kultur und Gepflogenheiten und seine Bewohner, die Mathematiker.



Peter Byrne

VIELE WELTEN

Hugh Everett III – ein Familiendrama zwischen kaltem Krieg und Quantenphysik

2012, XII, 356 S. 50 S-W-Abb. , geb., Spektrum-Springer

Bestell-Nr. 3525
€ 29,95 (D), **€ 30,80 (A)**

Peter Byrne erzählt die Lebensgeschichte von Hugh Everett III (1930–1982), dessen »viele Welten«-Theorie der multiplen Universen die Physik und Philosophie entscheidend beeinflusst hat. Anschaulich entwirft Byrne ein detailliertes Porträt des Genies, das eine Methode erfand, unser komplexes Universum von innen zu beschreiben. Er verwendet bisher unveröffentlichte Schriften von Everett und zahlreiche Interviews.

Piers Bizony

1001 WUNDER DES WELTALLS

Eine Reise durch das Universum

2012, 399 S. m. zahlr. Farbabb., geb., Kosmos

Bestell-Nr. 3498 **€ 39,99 (D),** **€ 41,20 (A)**

Vorbei an Ringplaneten und Eismonden geht es zu den Geburtsstätten der Sterne. Die fantastische Bilderreise zeigt die besten Aufnahmen der kosmischen Objekte und erläutert in kurzen und leicht verständlichen Texten deren Natur.

David Eagleman

INKOGNITO

Die geheimen Eigenleben unseres Gehirns

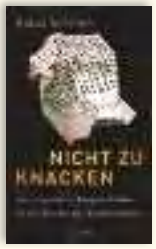
2012, 328 S. m. 20 S-W-Abb., geb., Campus

Bestell-Nr. 3501
€ 24,99 (D), **€ 25,70 (A)**

Wissen Sie, wer die Entscheidungen in Ihrem Leben trifft? Sie oder Ihr Unterbewusstsein? Wer tritt auf die Bremse, noch bevor wir ein Hindernis bewusst wahrgenommen haben? Eagleman führt Sie mit grandioser Leichtigkeit durch die mysteriösen Tiefen Ihres Gehirns und lässt das, was Sie für die Wirklichkeit gehalten haben, in völlig neuem Licht erscheinen.

»Ein kluges und fesselndes Buch – das Workout für Ihr Großhirn.« Nature

Besuchen Sie uns im Internet unter:
www.science-shop.de



Klaus Schmeh

NICHT ZU KNACKEN

Von ungelösten Enigma-Codes zu den Briefen des Zodiac-Killers

2012, 224 S. m. Abb., geb., Hanser Wirtschaft Wissen Weltgeschehen

Bestell-Nr. 3519
€ 18,90 (D), **€ 19,50 (A)**

Die meisten Rätsel der Kryptologie sind heute gelöst – jedoch nicht alle. Klaus Schmeh hat die bedeutendsten ungeknackten Codes der Verschlüsselungsgeschichte zusammengetragen. In abenteuerlichen Geschichten schildert er die vergeblichen Bemühungen, die Botschaften zu dechiffrieren.

Brian Clegg

WARUM TEE IM FLUGZEUG NICHT SCHMECKT UND WOLKEN NICHT VOM HIMMEL FALLEN

Eine Flugreise in die Welt des Wissens

2012, 238 S. m. zahlr. Abb., kart., Hanser

Bestell-Nr. 3518
€ 14,90 (D), **€ 15,40 (A)**

Nirgendwo sonst begeben wir uns so sehr in die Hand der Wissenschaft wie im Flugzeug. Brian Clegg erklärt, wieso wir ohne Relativitätstheorie ins Meer stürzen würden, weshalb Vielfliegen eine Verjüngungskur und eine wohlschmeckende Tasse Tee im Flugzeug ein Ding der Unmöglichkeit ist. Und er lehrt uns, wieder über die Welt zu staunen, die wir vom Flugzeugfenster aus wahrnehmen. Die perfekte Urlaubslektüre und der ultimative Flugbegleiter.

Rita Carter

GEHIRN UND GEIST

Eine Entdeckungsreise ins Innere unserer Köpfe

2012, VII, 374 S. m. 250 meist farb. Abb., kart., Spektrum

Bestell-Nr. 3504
€ 24,95 (D), **€ 25,70 (A)**

In diesem Buch zeigt uns die preisgekrönte Journalistin Rita Carter, was uns wissenschaftliche Untersuchungen und moderne Imaging-Techniken über die biologischen Mechanismen hinter unseren Gedanken und Emotionen und über Verhalten und Persönlichkeit verraten. Dieses viel gelobte Buch ist ein breit angelegter, visuell ansprechender Führer durch die Strukturen und Fähigkeiten jener gefalteten grauen Masse, die wir in unseren Köpfen herumtragen.

Bequem bestellen:

- **→ direkt bei** www.science-shop.de
- **→ per E-Mail** info@science-shop.de
- **→ telefonisch** +49 6221 9126-841
- **→ per Fax** +49 711 7252-366
- **→ per Post** Postfach 810680 • 70523 Stuttgart

Für Bestellungen außerhalb Deutschlands und Österreichs berechnen wir € 3,50 Versandkosten. Alle Preise inkl. Umsatzsteuer. Preise unter Vorbehalt. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH

Neu im Frühjahr 2012

STIRLINGMOTOR MIT TEELICHT-ANTRIEB

Bausatz für Tüftler ab 14 Jahre

Ca. 150 Einzelteile, ausf. Anleitung, aufgebaut knapp 25 cm hoch, Kraul

Bestell-Nr. 3520

€ 38,– (D), € 38,– (A)

Dieser Stirlingmotor entsteht buchstäblich aus der Dose, in der er verpackt ist. Angetrieben wird er durch die Wärme eines Teelichts und der Luftkühlung. Für den Zusammenbau der ca. 150 Teile brauchen Bastler 2–3 Stunden. Die gründliche Anleitung mit exakten Bildern führt Schritt für Schritt zum fertigen Motor. Zusätzlich benötigt werden nur einfache Werkzeuge und ein Teelicht.

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich

Ulrich E. Stempel

LERNPAKET EXPERIMENTE MIT ULTRASCHALL

2012, 2 Ultraschallsensoren, 2 Steckboards, Fledermausohr und viele Bauteile, Experimentierhandbuch mit 160 S., Franzis

Bestell-Nr. 3533 € 49,95 (D), € 49,95 (A)

Dieses Lernpaket vermittelt die Grundlagen der Ultraschalltechnik und führt Sie mit spannenden Experimenten zu vielen interessanten Einsatzmöglichkeiten. Große Vorbereitungen sind nicht notwendig – Sie können sofort loslegen und forschen. Dabei lernen Sie auch die Hintergründe praktischer Ultraschallanwendungen kennen, die aus unserem modernen Alltag nicht mehr wegzudenken sind – sei es in der Medizin oder im wissenschaftlich-technischen Bereich. Hier werden ständig neue, verblüffende und oft wegweisende Möglichkeiten entwickelt. Löten nicht erforderlich.

Ulrich E. Stempel

DAS SOLARBLOCKHAUS – BAUSATZ

145 Teile aus Holz, Solareinheit mit Motor, Propeller-Dreiflügler, Kunststoffschale zum Gras sähen, 1 Tüte Grassamen, Kokosnuss-Substrat, ab 6 Jahren, Inprosolar

Bestell-Nr. 3534 € 68,– (D), € 68,– (A)

Mit diesem Bausatz können Kinder spielerisch die Wind-und Solartechnik kennen lernen, denn am Blockhaus befindet sich ein Windgenerator. Im Vorgarten kann Rasen ausgesäht und beim Wachsen beobachtet werden. Wenn man das Haus nicht fest verleimt, kann es immer wieder neu auf- und abgebaut werden. Die 145 Stück Holzbalken und Kleinteile stammen aus dem traditionsreichen französischen Jura. Das Holz wird ausschließlich aus wiederbeforsteten Wäldern geschlagen, langsam getrocknet und umweltfreundlich verarbeitet.

DAMPFMASCHINE »MINI BEAM« – FERTIGMODELL

Länge: 106 mm, Breite: 49 mm, Höhe: 73 mm (über Schornstein), Kolbendurchmesser: 7 mm, Hub: 7 mm, Steuerung: Schiebersteuerung, doppelseitig wirkend, Gewicht: 96 g, Laufzeit: ca. 5 Min. mit einer Wasserfüllung, Hielscher

Bestell-Nr. 3535 € 149,50 (D), € 149,50 (A)

Die ersten funktionsfähigen Dampfmaschinen, die um 1750 zum industriellen Einsatz kamen, waren Beam=Balken=Balance, alles Maschinen mit einem auf einer Mittelsäule liegenden Balken: sowohl die atmosphärische Dampfmaschine von Thomas Newcomen von 1712 als auch die Niederdruckmaschine von James Watt um 1769. Dieser Maschinentyp wurde zunächst zum Pumpen von Wasser aus Bergwerken eingesetzt, später auch als Antriebsmaschine in Fabriken. Unser Modell, die kleinste, doppelseitig wirkende Beam-Dampfmaschine, wurde von Lutz Hielscher entwickelt. Mit Abdampfkondensator und aus Edelstahl, Messing und Aluminium.

Ebenfalls lieferbar als Bausatz:

DAMPFMASCHINE »MINI BEAM« – BAUSATZ

Bestell-Nr. 3536 € 136,50 (D), € 136,50 (A)

Andreas Martius

PAPIERFLIEGER DER EXTRAKLASSE, MIT CD-ROM

2012, 64 S. m. zahlr. farb. Abb., Beil.: Vorlagenbogen, geb., Christophoru

Bestell-Nr. 3539

€ 12,99 (D), € 13,40 (A)

Immer wieder ist es faszinierend, wie dieses gefaltete Stück Papier die Schwerkraft für eine Weile überwindet und sanft schwebt. Papierflieger sind aber nicht nur etwas zum Träumen, das Falten begeistert außerdem alle Konstrukteure. In dieser »Flugwerft für Profis« werden ganz besondere futuristische Modelle in einer speziellen Falttechnik gebaut, der Verhakung. So sind diese Flieger besonders stabil und flugsicher.

TASCHENPLANETARIUM

Der kleine Tierkreis

Mit 24-seitigem Begleitheft, Durchmesser der Tierkreisscheibe: 15 cm, Ständer aus Holz, für Kinder ab 12 Jahren, Kraul

Bestell-Nr. 3514

€ 25,90 (D), € 25,90 (A)

Das Taschenplanetarium ist ein astronomisches Hilfsmittel, um den Gang von Sonne, Mond und den Planeten anschaulich zu machen. Mit den verschiedenfarbigen kleinen Magnetscheibchen werden die Wandelsterne im Tierkreis markiert. Die drehbare große Tierkreisscheibe zeigt dann den Auf- und Untergang der Himmelskörper und Tierkreissternbilder. Für den Umgang mit dem Taschenplanetarium sind einige einfache astronomische Kentnisse notwendig. Diese werden im Anleitungsheft ausführlich erklärt.

Schöne Ostergeschenke

FASTFOOD NaCl – SALZSTREUER AUF RÄDERN

Ei auf Rädern, Salzstreuer, Porzellan /Kunststoff, mit Rückziehmotor, weiß mit farbigem Aufdruck; L x B x H: ca. 6 x 5,5 x 6,5 cm, Troika

Bestell-Nr. 3540 € 27,– (D), € 27,– (A)

»Kannst du mal bitte das Salz rüberrollen?« Wenn Sie das am Tisch hören, dann ist *Fastfood* im Spiel, das rollende Salzstreuer-Ei aus Porzellan. Der unsichtbare Rückziehmotor macht es zum Geschmacksflitzer auf jedem Tisch. Das Salz in der Suppe (oder auf dem Ei) des modernen Lebens. **Neues Design: bedruckt mit Rennstreifen und »NaCl« (chem. Formel für Salz).**

Ebenfalls lieferbar ohne Aufdruck in weiß:

FASTFOOD – SALZSTREUER AUF RÄDERN

Bestell-Nr. 3317 € 27,– (D), € 27,– (A)

PIEPEI GOLD

Das perfekte Frühstücksei für jeden Feinschmecker

Mit echtem Gold veredelt, Brainstream

Bestell-Nr. 2700

€ 24,90 (D), € 24,90 (A)

Einfacher und präziser können Frühstückseier nicht gekocht werden. Das PiepEi misst die Wassertemperatur und berechnet daraus über eine Differenzialgleichung die Innentemperatur im Ei. Erreicht die Temperatur im Eigelb 62 °C, so erklingt eine Melodie. Man kann den Kochvorgang auch mit kaltem Wasser starten.

CLACK – SCHLAGFERTIGER EIERÖFFNER

Der Eieröffner der anderen Art

Edelstahl mit Kunststoffgriff, Gewicht: ca. 100 Gramm, Höhe: ca. 22 cm, Ø der Eieröffnung: 36 mm, 12 Monate Garantie, Take2-Design

Bestell-Nr. 2716 € 18,90 (D), € 18,90 (A)

Der ultimative »Eierschalensollbruchstellenverursacher« funktioniert nach folgendem Prinzip: Kappe auf das Ei setzen, Schlagkugel herunterfallen lassen, Clack! So erhält die Schale eine ringförmige Bruchstelle, an der sich der »Eierkopf« fein säuberlich abheben lässt.

PEN ULTIMATE

Bestell-Nr. 1667

€ 13,90 (D), € 13,90 (A)

Der schwebende *Pen Ultimate* ist ein Blickfang für Ihren Schreibtisch. Der Kugelschreiber schwebt in einer speziellen Halterung und kann um die Längsachse in Rotation gebracht werden.

Besuchen Sie uns im Internet unter:
www.science-shop.de

Für Bestellungen außerhalb Deutschlands und Österreichs berechnen wir € 3,50 Versandkosten. Alle Preise inkl. Umsatzsteuer. Preise unter Vorbehalt. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH

Helmut Genaust

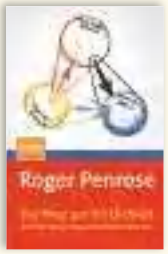
ETYMOLOGISCHES WÖRTERBUCH DER BOTANISCHEN PFLANZENNAMEN

2012, 704 S., Lizenz: Birkhäuser, geb., Nikol

Bestell-Nr. 3541 früher € 148,–,
jetzt nur € 9,99 (D), € 10,30 (A)

Das Buch vermittelt das Wissen über die Etymologie botanischer Pflanzennamen, also die Aufklärung über die Herkunft und Geschichte der wissenschaftlichen Gattungs- und Artnamen (einschließlich Bakterien, Algen, Pilzen, Moosen und Flechten) und gibt einen faszinierenden Einblick in die Geschichte der mannigfachen Beziehungen zwischen Pflanze und Mensch.

Bestellen +49 6221 9126-841
Sie direkt: @ info@science-shop.de



Roger Penrose

DER WEG ZUR WIRKLICHKEIT

Die Teilübersetzung für Seiteneinsteiger

2010, XII, 244 S. m. 50 Abb., geb., Spektrum

Bestell-Nr. 3021 früher € 24,95,
jetzt nur € 9,95 (D), € 10,30 (A)

Der Weg zur Wirklichkeit ist eine Kurzübersetzung des Penrose-Klassikers *The Road to Reality,* die aus dem Monumentalwerk für Physik- und Mathematikexperten die allgemeinverständlichen Kapitel für interessierte Laien lesbar macht. Wer ein Faible für die Grundfragen der Wissenschaft, einen Blick für Geometrie, einen Sinn für Zahlen und Neugier für kosmologische Theorien hat, findet in diesem klar und kompetent geschriebenen Buch überraschende und provozierende Ideen.

Besuchen Sie uns im Internet unter:
www.science-shop.de

Volker Reinhardt

ROM

Ein illustrierter Führer durch die Geschichte

1999, 287 S. m. 104 meist farb. Abb., 1 zweifarb. Stadtplan, geb., Beck

Bestell-Nr. 3489 früher € 19,90,
jetzt nur € 9,95 (D), € 10,30 (A)

Die zweieinhalbtausendjährige Geschichte der Stadt wird hier aus den sichtbaren Zeugnissen ihrer Vergangenheit erzählt und gedeutet. Ein historisches Gesamtbild, ein neuartiger und lebendiger illustrierter Stadt- und Geschichtsführer für alle Romreisenden mit über 120 weit gehend farbigen Abbildungen.

Manfred Spitzer, Norbert Herschkowitz

WIE ERWACHSENE DENKEN UND LERNEN, 3 AUDIO-CDS

2012, Laufzeit: 210 Min., m.Booklet, Galila

Bestell-Nr. 3502 früher € 44,85,
jetzt nur € 29,90 (D), € 29,90 (A)

In welchem Alter hört das Gehirn auf zu reifen? Worin zeichnet sich Weisheit bei einem alten Menschen aus? Ist es tatsächlich für einen 40-Jährigen schwieriger, eine Fremdsprache zu lernen, als für einen 20-Jährigen? Diese und viele weitere spannenden Fragen werden von den renommierten Hirnforschern Norbert Herschkowitz und Manfred Spitzer auf den drei CDs in gewohnt unterhaltsamer Weise beantwortet.

Von Peter Schütt, Hans J. Schuck, Bernd Stimm u. a.

LEXIKON DER BAUM- UND STRAUCHARTEN

Das Standardwerk der Forstbotanik

2011, 581 S. m. zahlr. Farb- u. S-W-Abb., kart., Originalverlag: Ecomed, Nikol

Bestell-Nr. 3481
früher € 101,24, jetzt nur € 9,99 (D), € 10,30 (A)

Das Lexikon bietet die botanischen Grundlagen und einen umfassenden Einblick in die Biologie der Holzpflanzen und des »Ökosystems Wald«. Mit Angaben zu natürlichen Arealen, Standortansprüchen, Wuchsleistungen und Art der wirtschaftlichen Nutzung, Gattungen, Familien, Ordnungen, Baumkrankheiten.

Philip G. Zimbardo

DER LUZIFER-EFFEKT

Die Macht der Umstände und die Psychologie des Bösen

2008, XXIII, 504 S. m. 24 Abb., geb., Spektrum

Bestell-Nr. 2694 früher € 39,95,
jetzt nur € 16,95 (D), € 17,40 (A)

Der renommierte Sozialpsychologe Philip Zimbardo erläutert in seinem Buch, wie wir alle für die Verlockungen »der dunklen Seite« anfällig sind und die unzähligen Gründe dafür. Anhand historischer Beispiele sowie seiner eigenen bahnbrechenden Forschungen führt er detailliert aus, wie situative Kräfte und gruppendynamische Prozesse zusammenwirken können, um aus anständigen Männern und Frauen Ungeheuer werden zu lassen.

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich

Andras Gedeon

FORTSCHRITTE DER MEDIZIN DURCH WISSENSCHAFT UND TECHNIK

99 wegweisende Veröffentlichungen aus fünf Jahrhunderten

2010, XII, 540 S., geb., Spektrum

Bestell-Nr. 3027 früher € 59,95,
jetzt nur € 19,95 (D), € 20,60 (A)

Dieser aufwändige Farbbildband ist eine Sammlung von 99 Essays über Meilenstein-Publikationen der letzten 500 Jahre aus dem weiten Feld wissenschaftlicher und technologischer Forschungsdisziplinen, die den Fortschritt der Medizin vorangebracht haben. Jeder Beitrag enthält eine Zusammenfassung der jeweiligen Publikation, eine kurze Biografie des Autors und eine Diskussion über den Einfluss der Entdeckung auf spätere Entwicklungen. Musterseiten aus dem ursprünglichen Artikel und Bilder aus der jeweiligen Zeit runden die Beiträge ab.

BESTELLCOUPON

Gleich bestellen! Einfach Bestellcoupon kopieren und faxen an: 0711/7252-366 oder ausschneiden und per Post schicken: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH • Science-Shop • Postfach 810680 D-70523 Stuttgart. Schicken Sie eine E-Mail an: info@science-shop.de oder rufen Sie an unter: 06221/9126-841.

JA, ich bestelle und habe 14 Tage volles Rückgaberecht

Anzahl	Bestell-Nr.	Titel	€

Besteller-Anschrift:

Name/Vorname

Straße/Hausnummer

Datum/Unterschrift

E-Mail-Adresse

☐ **Zahlung per Bankeinzug**

Geldinstitut/Ort

Konto-Nr.

BLZ

Datum/Unterschrift

☐ **Zahlung per Rechnung**

PLZ/Wohnort

Kunden-Nr. (falls vorhanden)

NIF12COUP

SERIE ENERGIE | TEIL 5

Energiespeicher der Zukunft

Wind, Sonnenenergie und Wasserkraft spielen eine immer größere Rolle für die Energieversorgung. Doch ihr Ertrag schwankt erheblich – was die Speichertechnik vor enorme Herausforderungen stellt.

Von Ferdi Schüth

Die Energiewende ist in vollem Gange, zumindest hier zu Lande. Im Jahr 2022 soll das letzte deutsche Kernkraftwerk vom Netz gehen. Ersatz muss her, doch möglichst nicht in Form fossiler Brennstoffe, denn mit zunehmenden Treibhausgasemissionen steigt die Gefahr, dass sich das weltweite Klima unbeherrschbar verändert. Zudem dürften wichtige konventionelle Energieträger, etwa Erdöl, in absehbarer Zeit knapp werden.

Es scheint unumgänglich, dass wir künftig einen großen Teil unserer Energieversorgung aus regenerativen Quellen bestreiten, sowohl aus Wind- und Wasserkraft wie auch aus der direkten Sonneneinstrahlung. Da deren Ertrag aber je nach Wetterverhältnissen stark schwankt, könnte es sein, dass wir künftig auf hochleistungsfähige Energiespeicher setzen müssen, um das Angebot der Nachfrage anzupassen. Speichertechnologien werden somit Schlüsselelemente unserer zukünftigen Energieversorgung sein.

Bislang hat sich das Speicherproblem kaum gestellt, denn Erdöl, Gas und Kohle sind nicht nur effiziente Brennstoffe, sondern zugleich hervorragende chemische Energiereservoire. Der Heizwert von Erdgas etwa beträgt 10 bis 14 Kilowattstunden pro Kilogramm und der von Dieselkraftstoff 12.

VATTENFALL EUROPE AG

Pumpspeicherkraftwerke wie das im thüringischen Goldisthal arbeiten mit hoher Effizienz. Gemessen am landesweiten Energieverbrauch ist ihre Speicherkapazität aber gering.

Eine leistungsfähige Lithiumionenbatterie mit einem Kilogramm Gewicht hingegen kann nur etwa 0,2 Kilowattstunden elektrische Energie aufnehmen. Das stellt deshalb ein Problem dar, weil die meisten regenerativen Energiequellen Elektrizität bereitstellen und nicht etwa eine chemische Verbindung: Windräder und Wasserturbinen treiben Elektrogeneratoren an, bei der Fotovoltaik erzeugt das Sonnenlicht eine Spannungsdifferenz, und auch die Solarthermie liefert – über ein erhitztes Medium, eine Turbine und einen Generator – elektrischen Strom. Da sich Elektrizität nur schwer speichern lässt, bringt es enorme Herausforderungen für die Netzbetreiber mit sich, wenn der Anteil regenerativer Quellen am Energiemix steigt. Schließlich müssen Angebot und Nachfrage von Strom immer sehr gut ausbalanciert sein, um Netzstörungen zu vermeiden.

Als Beispiel lässt sich die Windleistung herausgreifen, die in der Regelzone des Netzbetreibers »50 Hertz« – im Wesentlichen sind das die neuen Bundesländer – im April 2011 ins Netz eingespeist wurde (siehe Abbildung S. 74 unten). Sie schwankte innerhalb weniger Stunden um etwa 8000 Megawatt, was der kollektiven Leistung von sechs großen Kernkraftwerken entspricht! Es ist sogar schon mehrfach vorgekommen, dass ein Überangebot von Windstrom die Preise an der Leipziger Strombörse unter null drückte, weil die anderen Kraftwerke nicht schnell genug heruntergefahren werden konnten, um die Stromspitze zu kompensieren. Leistungsfähige, kostengünstige Energiespeicher könnten helfen, solche Schwankungen abzupuffern.

Dabei werden sie für sehr verschiedene Anforderungen benötigt. Kurzzeitige Spitzen im Stromangebot und -verbrauch dauern maximal einige Tage; sie ließen sich mit Speichern abfangen, die einige hundert Millionen Kilowattstunden fassen. In den meisten Weltregionen gibt es darüber hinaus aber auch deutliche Unterschiede im jahreszeitlichen Verbrauch. In Deutschland etwa ist der Gasbedarf im Winter mehr als doppelt so hoch wie im Sommer und der Strombedarf um zehn Prozent höher, da die Bürger ihre Heizungen aufdrehen. In den USA ist es anders herum: Hier liegt der sommerliche Stromverbrauch wegen der vielfach genutzten Klimaanlagen um etwa 20 Prozent höher als im Winter. Normalerweise stimmt das Angebot an regenerativ erzeugtem Strom nicht mit dem saisonalen Bedarf überein, so dass die Netzbetreiber für die Zeiten starker Nachfrage entweder zusätzliche Kraftwerke bereithalten oder jahreszeitliche Energiespeicher einsetzen müssten. Diese Reservoire müssten allerdings enorme Energiemengen vorhalten, in der Größenordnung von einigen hundert Milliarden Kilowattstunden. Hierfür kommen fast nur stoffliche Speicher in Frage, denn Batterien, Druckluft- oder Pumpspeicherkraftwerke besitzen längst nicht genügend Kapazität.

Künftige Elektrofahrzeuge wiederum benötigen kleine, mobile Energiedepots. Diese müssen einige zehn oder hundert Kilowattstunden fassen – millionenfach weniger als Speicher für das Stromnetz, was ganz andere Herausforderungen mit sich bringt. Das größte Problem dabei: Die hohe Energiedichte, die in den chemischen Bindungen von Benzin oder Dieselkraftstoff steckt, ist mit alternativen Speichertechnologien kaum zu erreichen. Deshalb haben heutige Elektroautos auch eine deutlich geringere Reichweite als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren.

Im Folgenden werden die wichtigsten Speichertechnologien sowie ihre Vor- und Nachteile vorgestellt.

Mechanische Speicherung

Elektrische Energie lässt sich relativ einfach in mechanische Energie und wieder zurück verwandeln. Dieses Prinzip nutzen etwa Pumpspeicherkraftwerke. Steht hier überschüssiger elektrischer Strom zur Verfügung, betreibt man damit Pumpen, um Wasser von einem niedrigen Reservoir in ein höher gelegenes zu pumpen. Später kann man das Wasser durch Turbinen ablassen, um seine potenzielle Energie wieder zurück in elektrische zu verwandeln. Die gespeicherte Energiemenge hängt ab vom Höhenunterschied der beiden Reservoire und der Masse des hochgepumpten Wassers, gemäß der physikalischen Formel für die potenzielle Energie: $E_{pot} = m \cdot g \cdot h$, wobei g die Schwerebeschleunigung der Erde ist, die etwa 9,8 Meter pro Quadratsekunde beträgt.

Bei einer Höhendifferenz von 300 Metern, was für Pumpspeicherkraftwerke in Deutschland typisch ist, speichert ein Kubikmeter Wasser etwa drei Megajoule elektrische Energie, das entspricht 0,8 Kilowattstunden. Alle deutschen Pumpspeicherkraftwerke zusammen haben eine Kapazität von etwa 38 Millionen Kilowattstunden. Dieser Wert lässt sich nicht mehr wesentlich steigern, denn es mangelt an geeigneten Standorten für neue Anlagen und die Genehmigungsverfahren ziehen sich meist lange hin (siehe SdW 2/2012, S. 84).

Die Bundesrepublik Deutschland verbraucht pro Jahr zirka 600 Milliarden Kilowattstunden Strom. Alle deutschen Pumpspeicherkraftwerke zusammen könnten das Land also etwa eine halbe Stunde lang mit Elektrizität versorgen. Mithin sind sie nicht geeignet, um über mehrere Tage hinweg zwischen Stromverbrauch und -nachfrage auszugleichen. Sie haben jedoch eine hohe Effizienz: Typischerweise gewinnen sie etwa 75 bis 80 Prozent der eingesetzten Energie zurück. Zudem gehören sie zu den Speichertechnologien mit den geringsten Kosten.

SERIE IM ÜBERBLICK

DIE ZUKUNFT DER ENERGIE

Teil 1	Strom aus der Sonne	Dezember 2011
Teil 2	Windräder	Januar 2012
Teil 3	Wasserkraft	Februar 2012
Teil 4	Biotreibstoffe	März 2012
Teil 5	**Energiespeicher**	**April 2012**
Teil 6	Wasserstofftechnologie	Mai 2012

AUF EINEN BLICK

VORRATSHALTUNG FÜR ENERGIE

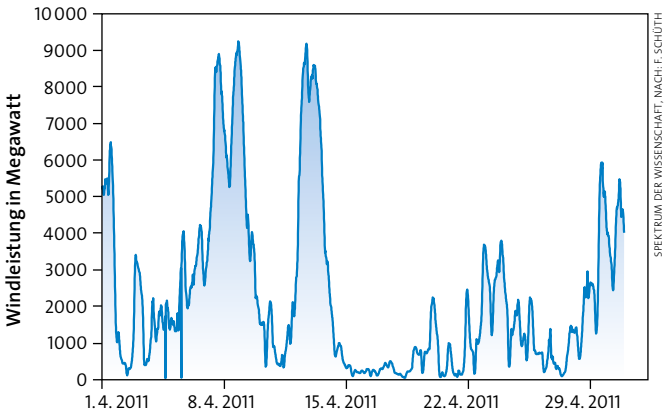
1 Eine Energieversorgung, die sich auf erneuerbare Quellen stützt, muss mit starken **Schwankungen im Stromangebot** umgehen. Sie benötigt daher große Energiespeicher, die das Leitungsnetz stabilisieren und eine verlässliche Stromversorgung gewährleisten.

2 Es gibt **verschiedene Speichertechnologien**, von denen manche sich bereits bewähren, während andere erst noch entwickelt werden. Sie untergliedern sich in mechanische, thermische, chemische und elektrochemische Reservoire.

3 Jede Speichertechnologie hat spezifische Vor- und Nachteile. Deshalb wird die **künftige Energieversorgung** sich wohl auf viele verschiedene stützen – je nachdem, ob es darum geht, Fahrzeuge anzutreiben, kurzfristige Netzschwankungen zu kompensieren oder jahreszeitliche Unterschiede im Energieverbrauch abzudecken.

Energie lässt sich auch in Druckluftspeichern vorhalten. Die Methode beruht darauf, Luft mit Hilfe überschüssigen Stroms in unterirdische, gasdichte Hohlräume zu pressen – bis auf einen Druck von 70 Bar. Zum »Anzapfen« des Speichers leitet man die komprimierte Luft in eine Gasturbine ein, deren Effizienz dadurch zunimmt. Auf diese Weise wird die gespeicherte Energie zurückgewonnen. Weltweit sind zwei solcher Anlagen in Betrieb, eine in Huntorf in Niedersachsen und eine in Alabama in den USA. Die gespeicherte Energiemenge hängt ab von der Größe der unterirdischen Höhlen und dem eingesetzten Luftdruck. Bei typischen Kavernengrößen von mehreren hunderttausend Kubikmetern lassen sich einige Millionen Kilowattstunden speichern.

Allerdings arbeiten Druckluftspeicher nur begrenzt effizient, wenn man die Wärme, die beim Verdichten frei wird, nicht zwischenspeichert – siehe unten – und beim »Wiederausblasen« an die Luft zurückführt (adiabatischer Betrieb). Dies geschieht bei den Anlagen in Huntorf und Alabama nicht, so dass deren Wirkungsgrade mit etwa 40 Prozent beziehungsweise 54 Prozent relativ niedrig liegen. Bei adiabatischem Betrieb gehen Experten von einer maximalen Effizienz von 70 Prozent aus; ob das im praktischen Betrieb erreicht werden kann, ist allerdings fraglich.



Leistung der Windkraftanlagen in der Regelzone des Netzbetreibers »50 Hertz«. Sie kann binnen Stunden um 8000 Megawatt schwanken – den Beitrag von sechs Kernkraftwerken.

Druckluftspeicherkraftwerke haben im Vergleich zu Pumpspeicherkraftwerken einen großen Vorteil: Der Eingriff in die Landschaft hält sich in Grenzen, der größte Teil der Anlage liegt tief unter Tage. Nur das Turbinenhaus und gegebenenfalls der Wärmespeicher befinden sich über der Erdoberfläche. Die Genehmigungsverfahren für solche Anlagen werden also weniger kompliziert verlaufen als die für große Pumpspeicherinstallationen.

Es gibt noch weitere mechanische Speichersysteme, etwa Schwungräder. Diese können aber nur relativ wenig Energie aufnehmen und haben auch recht hohe Reibungsverluste. Daher werden sie lediglich zur Netzstabilisierung eingesetzt.

Wärmespeicher

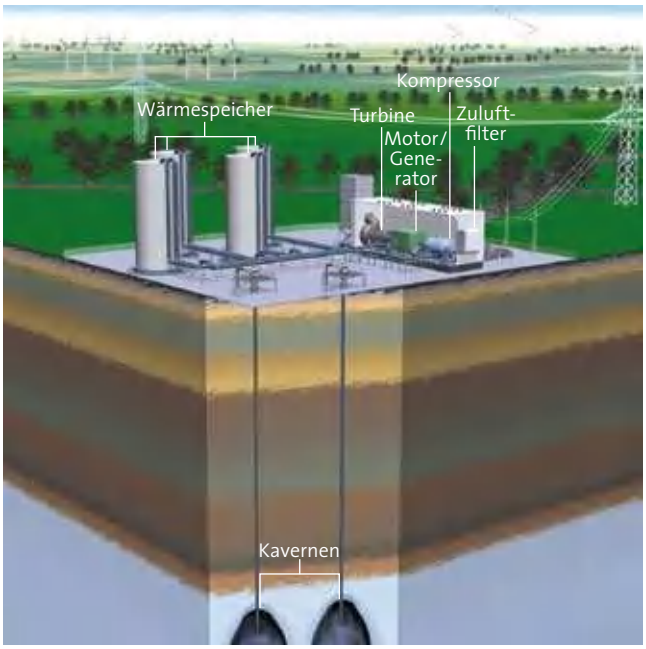
Wärme lässt sich meist nur unter erheblichen Verlusten in andere Energieformen umwandeln. Der carnotsche Wirkungsgrad η_c beschreibt die Fähigkeit, durch Ausnutzen eines Temperaturgefälles Arbeit zu leisten: $\eta_c = 1 - T_u/T_o$. Hierbei ist T_u die Temperatur des unteren Temperaturniveaus und T_o die des oberen (beide in Kelvin).

Je geringer also das Temperaturgefälle, desto weniger effizient ist es, Wärme in eine andere Energieform umzuwandeln, wobei in der Realität meist noch deutlich niedrigere Wirkungsgrade erreicht werden, als die obige Gleichung angibt. Daraus folgt, dass Wärmeenergie, die später als solche genutzt werden soll, auch in dieser Form gespeichert werden sollte, um Umwandlungsverluste zu vermeiden.

Grundsätzlich können Wärmespeicher sensible oder latente Wärme aufnehmen. Bei der sensiblen Wärmezufuhr erhöht sich die Temperatur des Speichermediums, etwa beim Erhitzen von flüssigem Wasser. Solche Speicher sind im Prinzip sehr einfach aufgebaut, doch sie benötigen eine gute thermische Isolation, um Wärmeverluste zu begrenzen. Anders bei Speichern, die latente Wärme aufnehmen: Bei ihnen bewirkt die Wärmezufuhr einen Phasenübergang oder eine chemische Reaktion, während die Temperatur konstant bleibt. Beispiele sind das Schmelzen von Wassereis oder das Hydrieren von Magnesium. Latentwärmespeicher haben allerdings den Nachteil, dass sie oft komplex aufgebaut und prozesstechnisch schwierig zu beherrschen sind.

Ein gutes Speichermedium für Wärmeenergie ist Wasser. Es hat eine große Wärmekapazität (4,2 Joule pro Kelvin und Gramm, verglichen etwa mit 0,9 bei Beton oder 2,1 bei einem typischen Thermoöl) und kann deshalb schon bei geringen Temperaturänderungen große Wärmemengen speichern. So heizt etwa der Deutsche Bundestag mit der Abwärme eines Motorheizkraftwerks, die in 300 Meter tiefen, Wasser führenden Gesteinsschichten zwischendeponiert wird. Die Siedlung Ackermannbogen in München verfügt über einen Wärmespeicher mit 5700 Kubikmeter Wasser, der etwa 300 Wohnungen mit Wärme versorgt und im Sommer mit 2900 Quadratmeter Kollektorfläche aufgeheizt wird. Selbst bei Einfamilienhäusern ließe sich dieses Prinzip umsetzen: Ein

RWE; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



Schema eines Druckluftspeicherkraftwerks. Es presst Luft mit Hilfe überschüssigen Stroms in unterirdische Kavernen; bei starker Nachfrage nach Strom lässt es die Luft wieder durch eine Turbine ab und gewinnt so elektrische Energie. Der Wirkungsgrad steigt, wenn man die Wärme, die beim Verdichten frei wird, zwischenspeichert und beim Ausblasen an die Luft zurückführt.

gut isolierter Wassertank von etwa 150 Kubikmetern reicht aus, um den Wärmebedarf eines nach modernem Energiestandard gebauten Hauses zu decken.

Eine alternative Methode ist die Hydrierung und Dehydrierung von Zeolithen – porösen Silikaten, die unter anderem als Ionenaustauscher, Trockenmittel und Katalysatoren dienen. Sie können bei erhöhten Temperaturen, wie sie mit Solarkollektoren erreicht werden, unter Verbrauch von Wärmeenergie entwässert werden. Bringt man sie später mit feuchter Luft in Kontakt, nehmen sie wieder Wasser auf, wobei Wärme frei wird. Die Speicherkapazität liegt bei 0,3 Kilowattstunden pro Kilogramm, für die Beheizung eines Hauses wären etwa 20 Kubikmeter Zeolith erforderlich. Da es sich hier um einen Latentwärmespeicher handelt, der bei konstanter Temperatur arbeitet, wäre keine aufwändige Isolierung wie bei einem Wassertank erforderlich.

Große Wärmespeicher mit einer Kapazität von Millionen Kilowattstunden machen es bereits möglich, dass auch Solarkraftwerke dazu beitragen können, die Grundlast im Stromnetz abzudecken. In den spanischen Parabolrinnenkraftwerken des Andasol-Komplexes etwa erhitzt ein Teil der eingefangenen Wärme mehr als 28 500 Tonnen Salzschmelze (ein Gemisch aus Kaliumnitrat und Natriumnitrat) auf knapp 400 Grad Celsius. In der Nacht lässt man das Salz auf knapp 300 Grad Celsius abkühlen und nutzt die frei werdende Wärme zum Verdampfen von Wasser, um damit die Strom erzeugenden Turbinen auch während der Nachtstunden zu betrei-

Natur
Energie
Plus

Mit der Natur auf einer Welle.

In den letzten zwölf Monaten haben sich über 25.000 Bürger für Strom aus 100 % Wasserkraft von NaturEnergiePlus entschieden. Wann wechseln Sie zum Strom aus sauberer Quelle?

→ Jetzt wechseln!

www.naturenergieplus.de

SOLAR MILLENIUM AG

Die solarthermischen Andasol-Kraftwerke in Spanien speichern die tagsüber gewonnene Wärmeenergie in Tanks (braun) mit Salzschmelze. Nachts gewinnen sie daraus elektrische Energie.

ben. Die thermische Speicherkapazität der Schmelze beträgt eine Million Kilowattstunden; die gespeicherte Wärme lässt sich zu etwa 37 Prozent in elektrische Energie umwandeln.

Auch in solarthermischen Anlagen könnten Latentwärmespeicher eingesetzt werden. Eine Möglichkeit, die für Temperaturen zwischen 300 und 500 Grad Celsius geeignet ist – also in dem Bereich, in dem Parabolrinnenkraftwerke arbeiten –, stellt die Hydrierung und Dehydrierung von Magnesium dar. Dieses System untersuchen wir seit vielen Jahren am Max-Planck-Institut für Kohlenforschung. Die Reaktion von Magnesium mit Wasserstoff setzt Wärme frei, das dabei entstehende Hydrid zerfällt bei 300 bis 500 Grad Celsius wieder in Magnesium und Wasserstoff, wobei sich die genaue Temperatur nach dem Wasserstoffdruck richtet:

$$Mg + H_2 \leftrightarrows MgH_2$$

Diese Reaktion speichert 0,9 Kilowattstunden pro Kilogramm Magnesium. Um eine thermische Speicherkapazität wie in den Andasol-Kraftwerken zu erreichen, wären nur etwa 1100 Tonnen Magnesium statt 28 500 Tonnen Salzgemisch erforderlich – bei einem Fünftel der Kosten. Allerdings bräuchte man noch zusätzliche Infrastruktur, um den Wasserstoff bereitzustellen. Dies ließe sich aber erreichen, indem man ein solarthermisches Kraftwerk, das elektrische Energie liefert, mit einem Solarkraftwerk kombiniert, das über einen thermochemischen Prozess direkt Wasserstoff erzeugt.

Batterien und Akkus

Elektrochemische Speicher gehören zu den bekanntesten Energiespeichern, denn wir nutzen sie täglich, etwa als Lithiumionenakkus in unseren Mobiltelefonen, Notebooks und vielen anderen technischen Geräten. Auch Elektroautos der neuesten Generation sind damit ausgestattet, und zumindest für das nächste Jahrzehnt werden solche Batterietypen Stand der Technik bleiben. Ein großer Vorteil von elektrochemischen Speichern ist ihre hohe Effizienz. Abhängig von den Lade- und Entladeströmen – kleine Ströme sind besonders effizient, führen aber zu langen Ladezeiten – lassen sich mehr als 90 Prozent der gespeicherten Energie zurückgewinnen.

Ein gebräuchlicher Lithiumionenakku hat eine Anode aus Graphit, mit eingelagerten Lithiumionen zwischen den Graphitebenen, sowie eine Kathode, die auf Kobaltoxid basiert. Die Reaktionen, die im Akku ablaufen, kann man vereinfacht formulieren als:

$$Li_xC_6 \leftrightarrows x\,Li^+ + x\,e^- + 6C$$
$$x\,Li^+ + x\,e^- + Li_{1-x}CoO_2 \leftrightarrows LiCoO_2$$
$$\overline{Li_xC_6 + Li_{1-x}CoO_2 \leftrightarrows 6C + LiCoO_2}$$

(Li = Lithium, C = Kohlenstoff, Co = Kobalt, O = Sauerstoff)

Lithium löst sich hier als positiv geladenes Ion von der Graphitanode und wandert durch die Batterieflüssigkeit hindurch zum Kobaltoxid. Es bleibt ein freies Elektron an der Anode zurück, das durch einen äußeren Stromkreis – den Verbraucher – zur Kobaltoxid-Kathode fließt. Dort nimmt ein vierfach positives Kobaltion das Elektron auf, wobei dreifach positives Kobalt entsteht, das zusammen mit Lithium als Lithiumkobaltoxid (LiCoO2) gebunden wird. Durch Anle-

gen einer externen Spannung lässt sich dieser Vorgang umkehren, was man nutzt, um den Akku wieder aufzuladen. Bei dem »x« in der Reaktionsgleichung handelt es sich um eine Zahl zwischen 0 und 1, die ausdrückt, dass die Redoxreaktion nicht vollständig abläuft, denn in diesem Fall würde der Akku sehr schnell zerstört. Für x zwischen 0,5 und 1 arbeitet er einigermaßen reversibel. Die Spannung eines solchen Lithiumionenakkus beträgt 3,6 Volt.

Von den wiederaufladbaren Batterien hat der Lithiumionenakku die höchste Speicherdichte mit knapp 0,2 Kilowattstunden pro Kilogramm. Bei zusammengeschalteten Akkuzellen, die zum Antrieb von Elektrofahrzeugen dienen, liegt die Speicherdichte allerdings etwas niedriger. Elektroautos haben einen Energiebedarf von etwa 0,15 Kilowattstunden pro Kilometer Fahrstrecke. Für eine Reichweite von 500 Kilometern, die eher am unteren Rand dessen liegt, was ein Pkw mit Verbrennungsmotor mit einer Tankfüllung erreicht, benötigt man also eine Batterie, die einschließlich der zusätzlich erforderlichen Komponenten mehr als eine halbe Tonne wiegt. Diese Masse lässt sich nicht wesentlich verringern, denn dazu müsste man die Energiedichte der Akkus erhöhen, was derzeit nicht erreichbar scheint. Allein auf die Kathode entfällt fast die Hälfte des Gesamtgewichts, und sie besteht immer aus Übergangsmetalloxiden oder ähnlichen Verbindungen, die nun einmal eine hohe Masse besitzen. Wesentlich leichtere Materialien, die diese Funktion erfüllen könnten, sind nicht in Sicht.

Metall-Luft-Batterien haben deutlich höhere Speicherdichten, allerdings lassen sie sich nicht wieder aufladen. Zwar laufen intensive Forschungen über wiederaufladbare Metall-Luft-Batterien und andere Batterietypen, etwa Lithium-Schwefel-Batterien. Ob solche Systeme allerdings praxistauglich werden, ist fraglich. Falls überhaupt, werden bis dahin noch viele Jahre, vielleicht Jahrzehnte vergehen.

Elektrofahrzeuge haben also ihre technischen Begrenzungen – aber sie eröffnen auch neue Möglichkeiten: Sie können nicht nur Autos mit Verbrennungsmotoren ersetzen, sondern zusätzlich als mobile, dezentrale Speicher im Elektrizitätsnetz dienen. In Deutschland gibt es etwa 42 Millionen Pkws, die die meiste Zeit des Tages nur herumstehen. Wenn jedes Auto eine Elektrobatterie hätte, die 75 Kilowattstunden speichern könnte, entspräche dies insgesamt einer Kapazität von 3,15 Milliarden Kilowattstunden – dem 80-Fachen aller deutschen Pumpspeicherkraftwerke zusammengenommen. Dieses Fassungsvermögen kann natürlich nicht vollständig zum Speichern von Strom genutzt werden, denn Autos dienen zunächst einmal dem Transport. Da zudem nicht klar ist, ob häufige Lade- und Entladezyklen die Lebensdauer der Batterien verringern, würde man diese vermutlich nur bei starkem Stromüberschuss laden, aber nicht bei Strommangel entladen. Trotzdem könnte eine große Zahl von Batteriefahrzeugen wesentlich dazu beitragen, Spitzen im Stromangebot zu glätten und dadurch das Leitungsnetz zu stabilisieren.

Auch stationäre Großbatterien werden wohl einen wichtigen Beitrag zur Netzstabilität leisten. Lithiumionenbatterien sind zwar derzeit noch zu teuer hierfür, doch entwickeln Wissenschaftler und Ingenieure zurzeit verschiedene kostengünstigere Technologien, wobei schwer abzuschätzen ist, welche sich durchsetzen wird. Stromspeicher mit einer Kapazität von mehreren hunderttausend Kilowattstunden können Flauten in Windparks oder Schlechtwetterperioden in Fotovoltaikanlagen überbrücken. Hierfür setzen Japaner und Amerikaner bereits heute Natrium-Schwefel- oder Redox-Flow-Batterien ein. Erstere beruhen auf der Reaktion von Natrium und Schwefel zu Natriumsulfid. Da beide Stoffe geschmolzen sein müssen, benötigen die Batterien eine Betriebstemperatur von 300 bis 350 Grad Celsius. Um diese aufrechtzuerhalten, muss man ständig Energie hineinstecken, weshalb Natrium-Schwefel-Batterien für die langfristige Speicherung nicht geeignet sind.

Redox-Flow-Batterien funktionieren über Redoxprozesse in Elektrolytlösungen. Am bekanntesten sind die Zink-Brom- und die Vanadium-Redox-Flow-Batterie, beide kommerziell erhältlich. Letztere zum Beispiel hat zwei Tanks mit Elektrolytlösungen; einer davon enthält zweifach positive Vanadiumionen (V^{2+}), der andere dagegen fünffach positive (V^{5+}). Um elektrische Energie bereitzustellen, wird an einer Elektrode V^{2+} zu V^{3+} oxidiert und an einer anderen V^{5+} zu V^{4+} reduziert. Dies erzeugt eine Spannungsdifferenz zwischen den Elektroden. Beim Aufladen der Batterie laufen die Reaktionen in umgekehrter Richtung ab. Die Oberfläche der Elektroden bestimmt die Leistung des Speichers, und die Größe der Tanks legt die deponierte Energiemenge fest, so dass sich die benötigten Ausmaße der Batterien sehr einfach bestimmen lassen. Zudem sind sie relativ robust. Allerdings haben sie

GENERAL MOTORS COMPANY

Fahrzeuge mit Elektroantrieb, etwa der Opel Ampera, könnten als mobile Speicher im Elektrizitätsnetz dienen und dazu beitragen, Spitzen im Stromangebot zu glätten.

den Nachteil einer niedrigen Speicherdichte (nur einige zehn Wattstunden pro Kilogramm).

Insgesamt gehören elektrochemische Batterien zu den am breitesten einsetzbaren Speichertechnologien und werden am intensivsten erforscht. Deshalb können wir hier in den kommenden Jahren deutliche Fortschritte erwarten – sowohl bessere Leistungen als auch fallende Kosten.

Von Wasserstoff bis Benzin

Chemische Speicher im engeren Sinn sind Stoffe, bei denen viel Energie in den chemischen Bindungen steckt. Zum Speichern großer Energiemengen über lange Zeiträume hinweg, etwa als jahreszeitliche Depots, kommen solche Stoffe besonders in Frage, da sie sich durch hohe Energiedichte und Lagerstabilität auszeichnen. Diskutiert werden dafür im Wesentlichen fünf Kandidaten, nämlich Wasserstoff, Methan, Methanol, Ethanol und Gemische aus flüssigen Kohlenwasserstoffen, zu denen etwa Benzin und Diesel zählen.

Wasserstoff gilt als besonders viel versprechender Energieträger (siehe Teil 6 der Energieserie in der kommenden SdW-Ausgabe). Seine massenbezogene Energiedichte fällt mit 33,3 Kilowattstunden pro Kilogramm enorm hoch aus, er ist ungiftig und verbrennt zu reinem Wasser. Allerdings hat er auch Nachteile: Da er gasförmig ist, besitzt er selbst bei hoher Kompression eine nur mäßige volumenbezogene Energiedichte; außerdem muss er selbst zunächst unter Energieeinsatz hergestellt werden. Dies kann mittels Elektrolyse geschehen, also durch Zersetzen von Wasser mit elektrischem Strom. Allerdings funktioniert der Umwandlungszyklus Elektroenergie-Wasserstoff-Elektroenergie derzeit nicht besonders effizient: Mit heutigen Technologien gehen dabei mehr als 70 Prozent der Energie verloren. Außerdem sind Elektrolysesysteme sehr teuer. Die Speicherung von kurzzeitig verfügbarem Überschussstrom durch Wasserelektrolyse wäre also mit hohen Kosten verbunden.

Wasserstoff lässt sich auch mit anderen Verfahren herstellen, diese sind aber weniger ausgereift. Solar-Turmkraftwerke etwa könnten das Sonnenlicht so stark fokussieren, dass Temperaturen entstehen, bei denen sich Zinkoxid in Zink und Sauerstoff zersetzt. Das Zink könnte später mit Wasser zu Zinkoxid und Wasserstoff reagieren, womit ein geschlossener Reaktionskreislauf entstünde. Geforscht wird zudem über Algen, die Wasserstoff als Stoffwechselprodukt erzeugen, doch ob sich das je technisch anwenden lässt, ist ungewiss. Auch die direkte fotokatalytische Spaltung von Wasser befindet sich noch im Stadium der Grundlagenforschung.

Die Lagerung von großen Mengen Wasserstoff ist jedenfalls möglich, etwa in unterirdischen Druckspeichern. Die

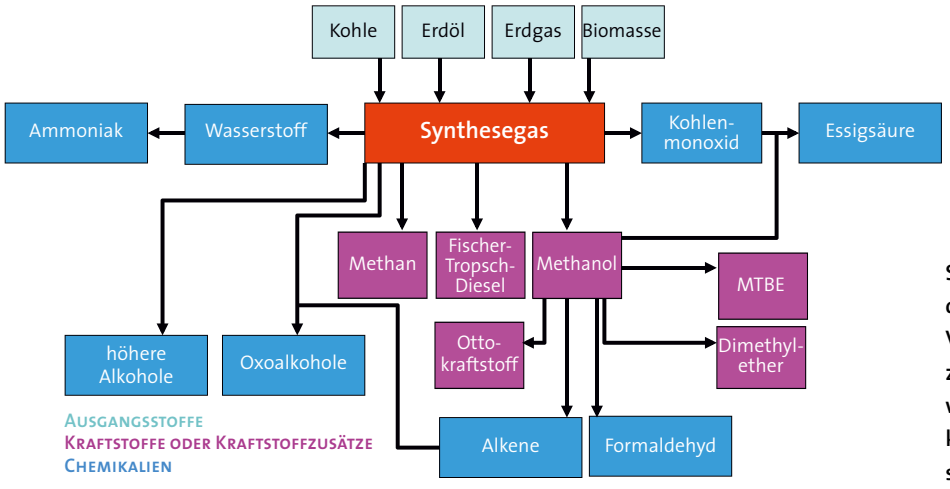
Alleskönner der Kohlenstoffchemie

Synthesegas ist im Wesentlichen ein Gemisch aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff. Es entsteht, wenn Wasserdampf bei hohen Temperaturen mit kohlenstoffhaltigen Verbindungen reagiert, etwa mit Kohle, Erdöl, Erdgas oder Biomasse. Je nachdem, welche Verbindung man hierfür einsetzt, enthält das Synthesegas mehr oder weniger Wasserstoff:

Aus Kohle: $CO : H_2 = 1 : 1$, entsprechend der chemischen Reaktion $C + H_2O \leftrightarrows CO + H_2$

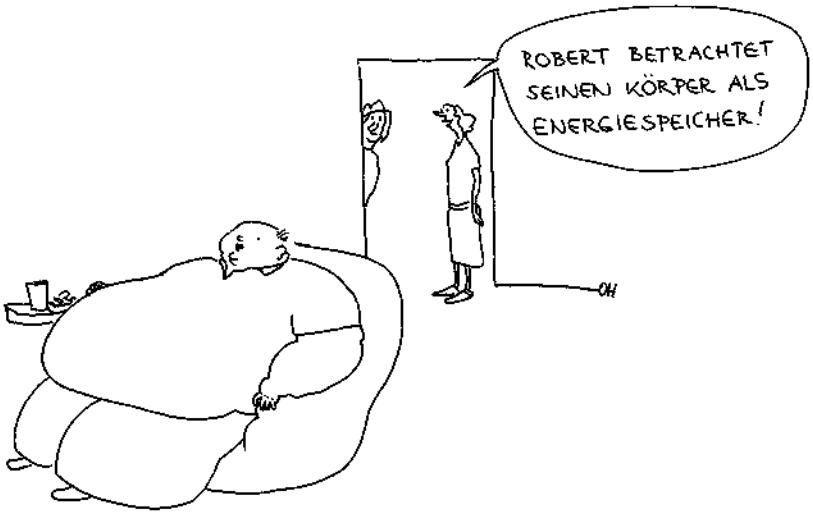
Aus Erdgas: $CO : H_2 = 1 : 3$, entsprechend der chemischen Reaktion $CH_4 + H_2O \leftrightarrows CO + 3H_2$

Mit Synthesegas lassen sich diverse Stoffe erzeugen, etwa Methan (mit Hilfe von Nickelkatalysatoren), Methanol (mit Hilfe von Kupfer-Zinkoxid-Katalysatoren) oder höhere Kohlenwasserstoffe (mit Kobalt- und Eisenkatalysatoren über den Fischer-Tropsch-Prozess). Methanol kann seinerseits zu Alkenen weiterverarbeitet werden, wichtigen Ausgangsmaterialien für Kunststoffe. Somit dient Synthesegas als Startpunkt für zahlreiche Verfahren der Kohlenstoffchemie und erlaubt auch die Herstellung von energiereichen Molekülen, die sich gut als chemische Langzeitspeicher eignen.



Synthesegas lässt sich aus diversen kohlenstoffhaltigen Verbindungen gewinnen und zu zahlreichen Substanzen weiterverarbeiten – etwa zu klimafreundlichen Kraftstoffen.

FERDI SCHÜTH; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



Kaverne des Clemens Dome in Texas beispielsweise, Teil eines Raffinerieverbunds, fasst 580 000 Kubikmeter und speichert Wasserstoff bei einem Druck bis zu 100 Bar. Angeblich gehen weniger als 0,01 Prozent des Gases pro Jahr durch Lecks verloren. Der Clemens Dome kann also Wasserstoff mit einem Energieinhalt von 170 Millionen Kilowattstunden vorhalten, woraus sich etwa 85 Millionen Kilowattstunden elektrische Energie gewinnen lassen – mehr als das Doppelte dessen, was alle deutschen Pumpspeicherkraftwerke bereitstellen können. Zwar gibt es derzeit weder Gasturbinen für den Betrieb mit reinem Wasserstoff noch Brennstoffzellen für Leistungen in Kraftwerksdimensionen, doch erscheinen solche Systeme grundsätzlich möglich.

Schwieriger umzusetzen sind Wasserstofftanks in Autos, um zusammen mit Brennstoffzellen eine Alternative zum Verbrennungsmotor zu ergeben. Druckspeicher mit 700 Bar weisen derzeit die größte Praxisreife auf, allerdings bei noch unbefriedigenden Speicherdichten.

Methan, der Hauptbestandteil von Erdgas, hat zwar eine niedrigere massenbezogene Speicherdichte als Wasserstoff, aber im gasförmigen Zustand eine etwa dreimal höhere volumenbezogene Dichte. Darüber hinaus gibt es in Deutschland bereits ein flächendeckendes Erdgasnetz mit großen unterirdischen Speichern, dessen Kapazität bei effizienter Verstromung ausreicht, um Deutschland für zwei bis drei Monate mit elektrischer Energie zu versorgen (siehe SdW 1/2012, S. 78). Methan lässt sich aus der Reaktion von Wasserstoff mit Kohlenmonoxid oder -dioxid gewinnen, allerdings ist das weniger effizient, als den Wasserstoff direkt zu nutzen. Viele Fürsprecher argumentieren zwar, das Kohlendioxid in Kraftwerksabgasen ließe sich in einen Wertstoff umwandeln, indem man es abscheide und mit regenerativ erzeugtem Wasserstoff zu Methan, Methanol oder flüssigen Kohlenwasserstoffen hydriere. Jedoch hat jeder dieser Prozesse eine negative CO_2-Bilanz, denn den hierfür erforderlichen Wasserstoff könnte man stattdessen in elektrische Energie umwandeln und dafür weniger fossile Brennstoffe verfeuern.

Attraktiver erscheint es, Biomasse in methanhaltiges Biogas umzusetzen. Allerdings muss man dabei sicherstellen, dass kein Methan aus den Biogasanlagen entweicht, da seine Treibhausgaswirkung 25-mal so hoch ist wie die von Kohlendioxid. Mit Gas- und Dampfturbinen lässt sich das Methan mit einem Wirkungsgrad von bis zu etwa 60 Prozent in Strom umwandeln; zusätzlich kann man die Abwärme des Prozesses nutzen. Auch Festkörperelektrolyt-Brennstoffzellen erlauben es, elektrische Energie aus Methan zu gewinnen, allerdings haben sie derzeit einen schlechteren Wirkungsgrad als Turbinen.

Methanol hat ebenfalls viel versprechende Eigenschaften als möglicher Energiespeicher. Es ist eine einfach handhabbare Flüssigkeit und leicht aus Synthesegas (siehe Kasten links) zu erzeugen – und dieses wiederum lässt sich unkompliziert aus fossilen Brennstoffen oder Biomasse gewinnen. Methanol kann Verbrennungsmotoren befeuern oder als Flüssigbrennstoff in Kraftwerken dienen. Insgesamt jedoch erscheint es anderen stofflichen Energiespeichern unterlegen: Erstens erfordert seine Herstellung immer Wasserstoff, der selbst effizienter als Speichermolekül genutzt werden könnte; zweitens gibt es kaum Infrastruktur für seinen Vertrieb und seine Verwertung; drittens liegt seine Speicherdichte deutlich niedriger als die anderer flüssiger Energieträger, etwa von Kohlenwasserstoffen, die sich ebenfalls aus Synthesegas herstellen lassen; und nicht zuletzt ist es giftig.

Der nächsthöhere homologe Alkohol dient bereits in großem Stil als stofflicher Energiespeicher: Ethanol, hergestellt durch Vergärung von Biomasse. Der wachsende Gebrauch dieses »Biokraftstoffs« konkurriert mittlerweile jedoch ernsthaft mit der Nahrungsmittelproduktion und führt zu handfesten Landnutzungskonflikten (siehe SdW 3/2012, S. 68). Das Gleiche gilt für Biodiesel, der durch Umesterung oder Hydrierung von pflanzlichen Ölen erzeugt wird.

Ethanol weist eine um etwa 30 Prozent höhere Energiedichte auf als Methanol und lässt sich problemlos dem Benzin für Ottomotoren beimischen. Um daraus in existierenden Kraftwerken elektrische Energie zu gewinnen, müsste man diese jedoch umbauen, so dass man hier vermutlich andere Lösungen bevorzugt. Gelänge es jedoch, Bioethanol nachhaltig und klimafreundlich zu produzieren, ohne dabei den Nahrungsmittelanbau zu beeinträchtigen, wäre es sinnvoll, daraus einen Teil der Kraftstoffe für den Verkehrssektor herzustellen.

Schließlich gibt es noch die Option, die derzeitige Infrastruktur für Benzin und Diesel unverändert zu lassen und weiterhin solche Kohlenwasserstoffe zu nutzen – diese aber aus erneuerbaren Quellen zu erzeugen. Der so genannte Fischer-Tropsch-Prozess, vor fast 90 Jahren am Max-Planck-Institut für Kohlenforschung erfunden, erlaubt die Herstellung hochwertigen Dieselkraftstoffs aus Synthesegas. Zudem gibt es Verfahren, um aus Synthesegas über Methanol und einen anschließenden Methanol-to-Gasoline-Prozess ein Kohlenwasserstoffgemisch zu erzeugen, das dem Benzin ähnelt. Gewinnt man das Synthesegas hierfür aus Biomasse, kann man klimafreundliche Kraftstoffe produzieren, denn der darin enthaltene Kohlenstoff ist mittels Fotosynthese vorher aus der Atmosphäre entfernt worden. Außerdem kann das Verfahren holzige Pflanzenteile verwerten und tritt

MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de

Unsere Themenseite »Energie«
finden Sie unter

www.spektrum.de/energie

dadurch nicht in Konkurrenz mit der Nahrungs- und Futtermittelindustrie. Etwa 40 Prozent des Energiegehalts von Biomasse lassen sich über den Umweg des Synthesegases in Kraftstoff umwandeln. Pilotanlagen laufen bereits, etwa am Karlsruher Institut für Technologie oder bei der Firma Choren in Freiberg.

Flüssige Kohlenwasserstoffe werden auf Grund ihrer hohen Energiedichte wohl auch weiterhin unverzichtbar bleiben. Flug- und Schwerlastverkehr etwa sind auf sie angewiesen. Für die nächsten Jahrzehnte stehen noch genügend fossile Rohstoffe zur Verfügung, aber in fernerer Zukunft werden aus Biomasse gewonnene Kohlenwasserstoffe eine zunehmend größere Rolle spielen. Erste Tests mit solchen regenerativ erzeugten Kraftstoffen sind bereits erfolgreich durchgeführt worden, sowohl in der militärischen als auch in der zivilen Luftfahrt.

Für jeden Einsatz die richtige Methode

Unsere künftige Energieversorgung wird sich wohl auf viele verschiedene Kraftwerkstypen stützen, und ähnlich vielfältig werden auch unsere Energiespeicher aussehen. Flüssige Kohlenwasserstoffe und Batterien etwa könnten Pkws betreiben. Ob Brennstoffzellen auf Basis von Wasserstoff sich gegen Batterieantriebe durchsetzen werden, hängt von vielen Faktoren ab – insbesondere davon, wie effizient und kostengünstig der Wasserstoff bereitgestellt werden kann.

Wärmespeicher in Verbindung mit solarthermischen Kraftwerken könnten kurzfristige Schwankungen der Wind- und Sonnenenergie ausgleichen. Auch Pumpspeicherkraftwerke, Druckluftspeicher und stationäre Großbatterien sind hierfür geeignet. Sie halten Energie für einen Zeitraum von mehreren Tagen bis Wochen vor, mit Kapazitäten in der Größenordnung von einigen tausend bis Millionen Kilowattstunden.

Für die Speicherung über Jahreszeiten hinweg kommen – neben sehr großen Stauseen – nur stoffliche Speicher in Frage. Wasserstoff und Methan scheinen die aussichtsreichsten Kandidaten zu sein, wobei sich Methan effizient aus Biomasse erzeugen lässt, soweit diese nicht für die Produktion flüssigen Kraftstoffs benötigt wird. Regional kann auch Ethanol eine wichtige Rolle spielen. Wenn es gelänge, Lignozellulose kostengünstig aufzuschließen und somit auch holzige Pflanzenteile massenhaft zu verwerten, dann ließen sich sowohl Methan als auch Ethanol in noch größeren Mengen aus Biomasse gewinnen (siehe SdW 3/2012, S. 68). Einige Bereiche, etwa der Luft- und Schwerlastverkehr, werden weiterhin benzin- oder dieselähnliche Kohlenwasserstoffe benötigen. Der Fischer-Tropsch-Prozess erlaubt es, diese vollständig regenerativ aus Biomasse herzustellen.

Der Heizenergiesektor wird sich wohl weit gehend vom Rest der Energieversorgung abkoppeln und zumindest in Neubauten an Bedeutung verlieren, da die immer bessere Gebäudeisolierung das Heizen zunehmend verzichtbar macht. Möglicherweise werden Wärmespeicher, die im Sommer »auftanken«, künftig sehr viel stärker zur Innenraumtemperierung beitragen als bisher. Wärmepumpen oder Drahtheizungen könnten gelegentliche Bedarfsspitzen auffangen.

Grundsätzlich gilt: Eine künftige, stark auf regenerative Quellen gestützte Energieversorgung wird vornehmlich Elektrizität bereitstellen. Da jede Umwandlung mit Energieverlusten behaftet ist, sollte man den elektrischen Strom so weit wie möglich direkt nutzen. Hierfür sind effiziente Leitungsnetze erforderlich, die sich möglichst über ganze Kontinente erstrecken sollten. Je großflächiger der Verbund, desto besser kann er lokale Schwankungen im Energieangebot ausgleichen, ohne auf Depots zurückzugreifen.

Mit gut aufeinander abgestimmten Kraftwerks-, Netz- und Speichertechnologien sollte es gelingen, auch ohne fossile Brennstoffe genügend Energie bereitzustellen. Allerdings wird sie dann vermutlich teurer sein als heute, denn mit Kohle, Öl und Gas nutzen wir zurzeit die Sonnenenergie, die über Jahrmillionen hinweg ohne unser Zutun in Biomasse deponiert wurde. Haben wir dieses Erbe erst einmal aufgezehrt, wird der Aufwand zur Energieversorgung steigen – und damit auch der Preis, den wir dafür zahlen müssen.

DER AUTOR

Ferdi Schüth ist Direktor am Max-Planck-Institut für Kohlenforschung. Er erforscht katalytische Prozesse, die eine wichtige Rolle für die Energieversorgung spielen, etwa die Aktivierung von Methan, die Umwandlung von Biomasse oder die Speicherung von Wasserstoff.

QUELLEN

Eberle, U. et al.: Chemische und physikalische Lösungen für die Speicherung von Wasserstoff. In: Angewandte Chemie 121, S. 6732–6757, 2009

Rinaldi, R., Schüth, F.: Hydrolysis of Cellulose as the Entry Point into Biorefinery Schemes. In: ChemSusChem 2, S. 1096–1107, 2009

Schüth, F.: Chemical Compounds for Energy Storage. In: Chemie Ingenieur Technik 83, S. 1984–1993, 2011

WEBLINKS

www.bine.info
Breites Informationsangebot und Newsletter über Energiespeicher vom FIZ Karlsruhe, das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördert wird

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1142722**

Fritz Vahrenholt, Sebastian Lüning
Die kalte Sonne
Warum die Klimakatastrophe nicht stattfindet
Hoffmann und Campe, Hamburg 2012.
448 S., € 24,99

GLOBALE ERWÄRMUNG

Und wieder mal die Sonne

Zwei Autoren haben den katastrophalen Klimawandel abgesagt – und sich prompt wohlbegründeten Widerspruch aus der Fachwelt eingefangen. Die hält die vorgebrachten Thesen für teils falsch, teils äußerst spekulativ.

Kaum erschienen, hat »Die kalte Sonne« Anfang Februar eine gewaltige Aufregung ausgelöst. Fritz Vahrenholt und Sebastian Lüning erwischten einen perfekten Zeitpunkt, denn Europa erstarrte gerade in einer Kältewelle. »Bild« gab den Autoren Raum, für ihre Sicht der Dinge zu werben. Andere Medien fielen über das Buch her, als hätte Beelzebub persönlich den Griffel geführt.

Es ist immer ein Ereignis, wenn ein Prominenter die Seiten wechselt. Fritz Vahrenholt machte 1978 Schlagzeilen, als er – gemeinsam mit Egmont R. Koch – in dem Buch »Seveso ist überall« die Risiken der chemischen Industrie anprangerte. Von 1991 bis 1997 war er für die SPD Umweltsenator in Hamburg. Danach wechselte der studierte Chemiker in die Wirtschaft. Seit 1999 lehrt er außerdem als Professor an der Universität Hamburg. Zurzeit ist Vahrenholt Geschäftsführer von RWE Innogy, der Tochter des Energiekonzerns RWE für erneuerbare Energiequellen.

Noch bis vor wenigen Jahren warnte er vor den Gefahren der globalen Erwärmung. Jetzt sagt er, wir könnten uns Zeit lassen mit der Energiewende. Die »kalte Sonne« gönne uns vorerst eine Verschnaufpause.

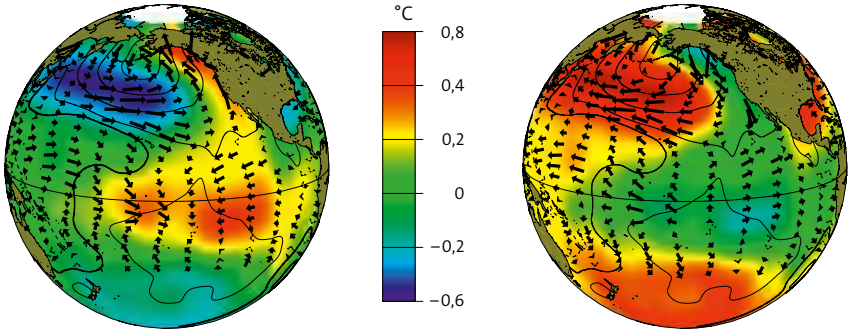
Vahrenholts Koautor, der Geologe Sebastian Lüning, arbeitet für RWE Dea, ein Explorations- und Förderunternehmen für Erdöl und Erdgas. Vier wissenschaftliche Gastautoren haben einzelne Kapitel geschrieben: Die für ihre Außenseiterthesen bekannten Professoren Nicola Scafetta, Nir Shaviv, Henrik Svensmark und Werner Weber erläutern, wie die Sonne das Klima der Erde beeinflussen könnte.

»Mindestens die Hälfte der Erwärmung der letzten 40 Jahre«, schreiben Vahrenholt und Lüning, sei »dem Einfluss der Sonne sowie zyklischen ozeanischen Oszillationen« geschuldet. Bis 2040 sei wegen der abnehmenden Aktivität der Sonne und der Meereszyklen mit einer Abkühlung zu rechnen, bis Ende des Jahrhunderts mit einer Erwärmung von einem Grad Celsius. Das Zwei-Grad-Ziel werde also ohnehin eingehalten. Auf einen »hektischen und daher riskanten Umbau der gesamten Industrielandschaft innerhalb von ein bis zwei Jahrzehnten« könne man darum verzichten.

Nicht nur die Energiezufuhr durch die Sonnenstrahlung selbst werde abnehmen; gleichzeitig lasse das Magnetfeld der Sonne nach, das die Erde bis zu einem gewissen Grad vor der kosmischen Strahlung abschirmt. Die energiereichen Partikel aus dem Weltraum würden daher vermehrt in die Atmosphäre eindringen und dort Kondensationskeime für kühlende Wolken bilden. Insgesamt seien die Auswirkungen der Sonnenaktivität auf das Klima viel größer, als es der Uno-Klimarat IPCC darstelle. Das Gremium ignoriere Mechanismen, die den solaren Einfluss verstärken würden.

Die meisten Fachleute, namentlich Reto Knutti, Mojib Latif, Jochem Marotzke und Hans von Storch, betrachten diese Thesen jedoch als bereits widerlegt oder zumindest höchst spekulativ. Zwar haben Schwankungen der Sonnenaktivität das Klima in den vergangenen Jahrhunderten beeinflusst, wie sich an natürlichen Klimaarchiven in Sedimenten und Eisbohrkernen erkennen lässt. Seit Mitte des 20. Jahrhunderts aber wird die Entwicklung des Klimas nach ihrer Ansicht von der Erwärmung durch den verstärkten Treibhauseffekt dominiert.

Wo die Kondensationskeime für die Wolkenbildung herkommen, ist allerdings noch nicht vollständig geklärt. Von der Erd- oder Meeresoberfläche hochgewirbelte Partikel tragen dazu nur die Hälfte bei. Für den Rest ist ionisierende Strahlung aus dem Weltall in der Tat ein Kandidat. Zurzeit laufen entsprechende Experimente am europäischen Kernforschungszentrum CERN. Es gilt aber als sehr zweifelhaft, ob sich durch die Strahlung Kondensationskei-



Die Pazifische Dekaden-Oszillation (PDO): Im Rhythmus von 20 bis 30 Jahren tauschen Warm- und Kaltwassergebiete im nördlichen Pazifischen Ozean ihre Plätze.

me in ausreichender Größe und Menge bilden würden.

Was die ozeanischen Klimaschwankungen angeht, weisen Vahrenholt und Lüning zu Recht darauf hin, dass die Atlantische Multidekadische Oszillation und die Pazifische Dekaden-Oszillation (Bild S. 81) die globale Mitteltemperatur auf und ab treiben können. Diese werden aber – anders, als die Autoren behaupten – in den IPCC-Berichten keineswegs vernachlässigt. Ozeanische Oszillationen sind in den Computermodellen zur Simulation des Klimas enthalten und gehen, nachdem die Modelle an Beobachtungsdaten geeicht wurden, mit in die Klimaprognosen des IPCC ein. Wohl hegen manche Forscher, etwa Judith Curry vom Georgia Institute of Technoloy, Zweifel an der Güte der Modelle und des gesamten Verfahrens und halten darum die IPCC-Warnungen für übertrieben. Das haben die Buchautoren aber nicht herausgearbeitet.

Das grundsätzliche Problem des Buchs liegt darin, dass Vahrenholt und Lüning sich nicht gut genug in der Klimaforschung auskennen. Daher stolpert man über viele Ungenauigkeiten, Missverständnisse und Fehler. So behaupten die Autoren auf S. 25, der IPCC habe prognostiziert, dass die Temperaturen pro Jahrzehnt um 0,2 Grad Celsius zunehmen würden, doch in den letzten Jahren sei ja kein Temperaturanstieg mehr zu verzeichnen gewesen. Haben sie den Klimarat bei einer Fehleinschätzung ertappt? Nein – richtig ist, dass der IPCC unter bestimmten plausiblen Annahmen für die kommenden 20 Jahre einen gemittelten Anstieg von 0,2 Grad pro Jahrzehnt vorhergesagt hat. Er kann durchaus von jahrelangen Erwärmungspausen (wie seit 2002) unterbrochen werden.

Nichts spricht dagegen, auf noch offene Fragen in der Klimaforschung hinzuweisen. Es gibt zweifellos auch Mängel in der IPCC-Berichterstattung. Fehlerhafte Analysen und verwegene Prognosen helfen aber niemandem weiter. Das Autorenduo hat es damit verpasst, einen aufklärenden Beitrag zur Klimadebatte zu leisten.

Es ist bedauerlich, dass dieses mängelbehaftete Buch so viel Aufmerksamkeit gefunden hat. Die Polarisierung der Debatte über die globale Erwärmung hat dadurch wieder zugenommen.

Man darf gewiss auch über die Effektivität der Maßnahmen streiten, die im Zuge der Energiewende getroffen werden. Vahrenholt und Lüning legen im letzten Kapitel den Finger in diese Wunde. Hätten sie sich doch nur auf das Thema beschränkt! An der Wissenschaft jedoch haben sich die beiden Autoren verhoben.

Sven Titz
Der Rezensent ist promovierter Meteorologe und freier Journalist in Berlin.

Hugh Johnson
Bäume
Die Wald- und Gartenbäume der Welt
Aus dem Englischen von Bettina Borst, Martina Walter und Frank von Berger. Haupt, Bern 2011. 400 S., € 59,90

BOTANIK

Blumenesche als Barockmätresse

Der Weinexperte Hugh Johnson hat zu den Bäumen ein sehr individuelles und genießerisches Verhältnis.

Dieses Buch ist nicht neu. Der Brite Hugh Johnson, der im deutschen Sprachraum eigentlich nur als Verfasser eines Standardwerks über Wein bekannt ist, hat das Original »Trees« in der ersten Version bereits 1973 geschrieben. Es ist bei Weitem nicht das erste Buch zum Thema. Anders als der Untertitel behauptet, behandelt es nicht alle Wald- und Gartenbäume der Welt, sondern nur die wichtigsten, mit Schwerpunkt auf den gärtnerisch interessanten. Es ist – entgegen dem Klappentext – kein Standardwerk für Gärtner, Forstwirte und Landschaftsarchitekten, sondern wendet sich an den interessierten Laien. Und dem ersten Eindruck – groß, schwer und voller opulenter Bilder – zum Trotz ist es kein »Coffee Table Book«, das man bewundernd durchblättert und dann ungelesen beiseitelegt. Gleichwohl ist es ein Prachtwerk, was auch der britische Historiker und Baumautor Thomas Pakenham im Vorwort bestätigt.

Man kann das Buch beim Blättern, Lesen und Anschauen genießen. Man kann es als Nachschlagewerk benutzen, beispielsweise um den Unterschied zwischen Sequoia und Thuja kennen zu lernen; systematische Vollständigkeit und absolute Korrektheit darf man nicht erwarten. Aber das Wertvollste, was den »Baum-Johnson« vor den meisten Baumbüchern auszeichnet: Er vermittelt nicht nur Wissen, sondern vor allem auch Freude; und er regt zur Pflanzung und Pflege von Bäumen im eigenen Garten an.

Das im ersten, etwa 70-seitigen Teil ausgebreitete Allgemeinwissen geht sehr in die Breite, aber mangels Raum kaum in die Tiefe. Aufbau und Funktion von Stamm, Ast, Blüte und Frucht sind übersichtlich dargestellt. Es folgen kurze Artikel über Wurzel und Boden, Waldbewirtschaftung, den Einfluss des Wetters, die Eiszeiten und – einzigartig – acht Seiten über Persönlichkeiten, Forscher und Sammler, die sich in irgend-

einer Weise um die Sache der Bäume verdient gemacht haben. Eine Johnson-Seite entspricht dabei immerhin zwei Seiten normaler Buchgröße.

Der zweite Teil, etwa 280 Seiten, beschreibt die wichtigsten Baumarten oder Artengruppen und entspricht damit für sich genommen schon einem üblichen Baumbuch. Großformatig werden einzelne Baumarten oder typische Wälder gezeigt, kleinere Bilder verdeutlichen Einzelheiten von Blatt und Frucht, Reihen von Zeichnungen erlauben Vergleiche von Arten oder Formen, Baumsilhouetten illustrieren die Größenverhältnisse und das Wuchsverhalten. Alle Bilder sind farbig und von vorzüglicher Qualität.

Der dritte Teil mit etwa 50 Seiten ist ein Tabellenwerk mit nützlichen Hinweisen zu Baumeigenschaften, Standortansprüchen und Verwendung.

Wer das Buch als Anleitung für die Arbeit im eigenen Garten nutzen möchte, stößt vielleicht beim Blättern auf ein Bild der Blumenesche und liest: »Sie präsentiert im Frühjahr ihre herrlichen cremeweißen Blüten wie die Barockmätresse Nell Gwynn und ihre Zeitgenossinnen ihre von Samt gerahmten Dekolletés auf den Wänden ehrwürdiger Gemäldegalerien. Der eher kleine, reich belaubte Baum ist eine ausgezeichnete Art für den Landschaftsgärtner.« Die sachlichen Einzelheiten wie der lateinische Name *(Fraxinus ornus)*, die Wuchshöhe (bis zu 15 Meter, 4,5 Meter nach 20 Jahren), die Standortansprüche (sonnig), die Eigenschaften von Krone, Blättern, Blüten und Früchten sowie Hinweise zur Pflanzung und Pflege finden sich im Tabellenteil, mit dessen Hilfe man sich auch systematisch den zu den eigenen Vorstellungen passenden Baum heraussuchen kann.

Das Buch ist ein Schatzkästchen bereichernder Nebenbemerkungen. Die Blüten-Kirsche »ist mehr ein Ereignis als ein Baum und bildet den Höhepunkt im Jahreskreis; sie wirkt verführerisch und unschuldig zugleich«. Die Platane »verbindet Eleganz mit Weltgewandtheit«. »Die Kiefern folgen ihrer Evolutionstaktik und beschäftigen so die Botaniker.« »Nach Thukydides sind die Völker des Mittelmeerraums dank dem Wein und der Olive der Barbarei entkommen.« »Die Pappel hieß bei den Römern *populus*, Volk, weil sie nach Horaz zur Beschattung öffentlicher Versammlungsplätze angepflanzt wurde.«

Johnson behandelt seine Bäume gern als Wesen mit einem individuellen Charakter. Da finden sich eigenwillige Attribute wie »Schönheitskönigin«, »wandlungsfähige Exzentriker«, »gigantisches Gemüse«, »mit ehrenwerter Erscheinung« oder »mit Schrullen und Marotten«.

Gelegentlich schiebt der Autor kleine, isolierte praktische oder wissenschaftliche Einzelheiten ein. Wie nahe am Stamm soll ein Ast abgeschnitten werden? Die Birnensorte Conférence ist noch immer die erfolgreichste im Handel; die Zeit ihres perfekten Reifegrads dauert nur 24 Stunden. Die Schwarze Walnuss *(Juglans nigra)* vergiftet benachbarte Bäume, besonders Obstbäume, durch einen Stoff aus ihren Wurzeln. Die Mehlbeere ist auf Grund moderner DNA-Analysen nicht mehr derselben Gattung *Sorbus* zuzuordnen wie die Vogelbeere, sondern einer neu eingerichteten Gattung namens *Aria*.

JOHNSON: BÄUME. HAUPT VERLAG 2017 / ANDREW LAWSON

Jahrzehntelang wächst sie geradeaus nach oben, dann verliert sie den Haupttrieb und bildet den typischen abgeflachten Wipfel: die Libanon-Zeder.

JOHNSON: BÄUME HAUPT VERLAG 2011 / SAUING HALL PRESS

Die größte und älteste Hängeform der Frühjahrskirsche *Prunus pendula* (hier in La Torrechia bei Rom) überspannt mit ihren Zweigen mehr als 25 Meter.

Positiv für praktisch orientierte Benutzer ist das dauernde Eingehen auf die Größe und das Wuchsverhalten der Bäume. Wer bei der Pflanzung schon beachtet, wie groß ein Baum in 10, 20 oder 100 Jahren sein wird, kann viel Schaden und Ärger vermeiden. Vielen Architekten täte dieses Wissen gut!

Das Buch enthält weder Herkunftsangaben für Darstellungen und Tabellen noch ein Literaturverzeichnis. Der Kleindruck von Bildtexten und Tabellen und der leidige Graudruck machen das Lesen unnötig schwer. Die Übersetzung ist stilsicher und scheint fehlerlos zu sein.

Das krasse Gegenstück zum gleichen Thema ist »The Secret Life of Trees« von Colin Tudge (2006). Bei ähnlicher inhaltlicher Breite geht es grundsätzlich, aber in knappstem Stil, in die Tiefe, verzichtet fast völlig auf Illustrationen und ganz auf persönliche und unterhaltende Zusätze. Kompakte 350 Gramm gegenüber ausschweifenden zwei Kilogramm!

Wer mit dem vorliegenden Buch den Geist Johnsons aufnimmt, wird mit der Zeit nicht nur vielseitig, sondern auch wagemutig werden und Freude an Bäumen und der Arbeit mit ihnen gewinnen. »Bäume sind ein wunderbares Gemeingut. Überall kann man sich über sie freuen, ohne einen Cent zu bezahlen.«

Felix Thommen

Der Rezensent hat an der ETH Zürich Forstingenieur studiert, war Leiter eines Kreisforstamts und ist seit 1993 im Ruhestand.

Worldwatch Institute (Hg.) in Zusammenarbeit mit der Heinrich-Böll-Stiftung und Germanwatch
Zur Lage der Welt 2011
Hunger im Überfluss
Neue Strategien gegen Unterernährung und Armut
Oekom, München 2011. 288 S., € 19,95

WELTERNÄHRUNG

Kleine Schritte gegen den Hunger

Immer mehr Menschen, immer weniger Anbaufläche: Wie können wir zukünftig genügend Nahrungsmittel für alle Menschen bereitstellen? Viele Hilfsprojekte geben Beispiele für konkrete Maßnahmen – doch es bleibt viel zu tun.

Im Jahr 2009 wurden weltweit über 2,5 Milliarden Tonnen Getreide geerntet. Das macht für jeden der sieben Milliarden Erdbewohner ziemlich genau ein Kilogramm pro Tag. An der schieren Menge liegt es also nicht, dass etwa eine Milliarde Menschen Hunger leiden, und das mit steigender Tendenz.

Über die Hälfte aller Nahrungsmittel kommt gar nicht bis zum Endverbraucher. Ein Großteil der Produktion wird als Futtermittel genutzt (35 Prozent weltweit, in Deutschland sogar 62 Prozent). Manches verarbeitet die Industrie, zum Beispiel zu Biokraftstoff. Und vieles landet im Müll statt auf dem Teller – je nach Art des Lebensmittels bis zu 75 Prozent der gesamten Produktion.

Eine naheliegende Lösung des Hungerproblems sah man lange darin, die Menge der produzierten Nahrungsmittel zu erhöhen. Genau das haben wir in den letzten Jahrzehnten getan, allerdings ohne darauf zu achten, ob der Anbau nachhaltig ist oder unsere Konsumgewohnheiten fair sind. Aber unter den Bedingungen des Klimawandels werden die bisherigen Bemühungen mit dem Wachstum der Weltbevölkerung nicht Schritt halten. Um im Jahr 2050 etwa neun Milliarden Menschen auf der Welt zu ernähren, müssen heute die Weichen gestellt werden, meinen die Herausgeber.

Der Bericht »Zur Lage der Welt«, den die internationale, in Washington ansässige Forschungsorganisation Worldwatch Institute jedes Jahr herausbringt, konzentriert sich 2011 auf Afrika, weil dort einerseits ein großer Teil der Bevölkerung Hunger leidet, andererseits viele Projekte zeigen, wie nachhaltige Entwicklung in der Landwirtschaft aus-

sehen kann. Die deutsche Version, an der das Entwicklungspolitikinstitut Germanwatch und die den Grünen nahestehende Heinrich-Böll-Stiftung beteiligt waren, enthält Ergänzungen und Informationen speziell zu Deutschland und der Europäischen Union.

Über 30 Autoren, allesamt in Hilfsorganisationen oder Stiftungen beschäftigt, liefern eine detaillierte Analyse der Weltagrarpolitik und ihrer Folgen. Gerade das Kapitel von Christine Chemnitz (Heinrich-Böll-Stiftung) und Tobias Reichert (Germanwatch) macht deutlich, wie entscheidend sich die EU-Agrarpolitik auf den internationalen Markt auswirkt: Dadurch, dass die EU ihre teuren Produkte durch Subventionen auf dem Weltmarkt konkurrenzfähig macht, sinken dort die Preise immer weiter. Und ganz abgesehen davon, dass diese Maßnahmen so, wie sie ausgestaltet sind, die großen Betriebe gegenüber den kleinen bevorzugen, treffen sie gerade Afrika besonders hart. Dort nämlich werden landwirtschaftliche Erzeugnisse häufig nicht nur nicht subventioniert, sondern sogar besteuert, mit dem Effekt, dass es billiger ist, Nahrungsmittel zu importieren, als sie im eigenen Land anzubauen. Das wiederum nimmt vor allem der ländlichen Bevölkerung in armen Regionen die Existenzgrundlage.

Schon heute ist der Agrarsektor für knapp 15 Prozent der Treibhausgase verantwortlich. Rechnet man zusätzlich zu den direkten Emissionen die Entwaldung und den Energieverbrauch, der für die Düngemittelherstellung nötig ist, kommt man sogar auf 30 Prozent. Aber gerade die Landwirtschaft leidet unter veränderten klimatischen Bedingungen, die durch Treibhausgase ausgelöst werden. Was also tun?

Hier liefern die Autoren zwar keine neuen Lösungen, doch sie zeigen, wie wir durch viele kleine Schritte die Landwirtschaft weltweit nachhaltig gestalten können. Dazu zählen Fruchtwechsel und biologische Schädlingsbekämpfung für einen gesunden, nährstoffreichen Boden ebenso wie Bäume und Sträucher am Rand der Nutzflächen, die den natürlichen Nährstoffkreislauf aufrechterhalten und gleichzeitig als Habitat für Tiere dienen. Nachdem Bauern in Malawi um ihre Felder herum Stickstoff speichernde Bäume anpflanzten, die den Boden auf natürliche Weise mit Nährstoffen anreicherten, konnten sie ohne Zusatz von anderen Düngemitteln die vierfache Maisernte einfahren.

Besonders wichtig ist es, traditionelle Anbau- und Konservierungsmethoden wiederzubeleben. Noch immer gehen in armen Ländern 25 bis 50 Prozent der Ernte allein durch schlechte Lagerung und Schädlinge verloren. Mit Hilfe neuartiger Lagersysteme konnte man in Westafrika die Kuhbohne, eine der wichtigsten regionalen Nutzpflanzen, besser vor Fäulnis schützen.

In Afrika liegt die effektive Niederschlagsmenge um 50 Prozent unter dem globalen Mittelwert. Und nur 20

Praktisches aus dem Lesershop

Sammelkassette

Die Sammelkassette von **Spektrum der Wissenschaft** bietet Platz für 12 bis 15 Hefte und kostet € 9,50 (zzgl. Versand).

Jahrgangs-CD-ROM SdW 2011

Die CD-ROM bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bilder) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Diese sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche ab der Erstausgabe 1978. Die CD-ROM läuft auf Windows-, Mac- und Unix-Systemen (der Acrobat Reader wird mitgeliefert).
Des Weiteren finden Sie das **Spektrum.de**-Archiv mit zirka 11 000 Artikeln. **Spektrum.de** und das Suchregister laufen nur unter Windows.
Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,– (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland); erhältlich ab Ende Februar 2012.
ISBN 978-3-941205-92-5

Spektrum DER WISSENSCHAFT
WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

online: spektrum.de/lesershop
E-Mail: service@spektrum.com
Tel.: 06221 9126-743

Fax: 06221 9126-751
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg

Christian Hesse

***Achtung Denkfalle.** Die erstaunlichsten Alltagsirrtümer und wie man sie durchschaut*

C.H.Beck, München 2011. 224 S., € 18,–

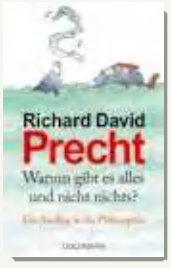
Christian Hesse hält es nicht in den Grenzen seiner Wissenschaft, der Stochastik. Immer wieder schreibt der Mathematiker von der Universität Stuttgart vergnügliche Bücher, das neueste über unsere geläufigsten Selbsttäuschungen, die »Alltagsirrtümer«. Das bekannteste Beispiel, das immer wieder mal die Öffentlichkeit beschäftigt, ist das »Ziegenproblem«: Hinter welcher von drei Türen steckt die Ziege, und wie hat man die Wahrscheinlichkeiten dafür einzuschätzen? Anderen Fehlschlüssen unterliegen wir bei Fragen von Leben und Tod (»Wenn du denkst, der Rückgang der Störche hat die Geburtenrate verringert«, »Warum man wahrscheinlich doch keinen Krebs hat, selbst wenn der Krebstest gerade positiv ausfiel«). Nicht alle Fälle sind neu, aber Hesses Aufklärungen sind immer witzig und originell – beste Unterhaltungsmathematik. REINHARD BREUER

Felice C. Frankel, George M. Whitesides

***Der Nanokosmos.** Die wunderbare Welt der kleinsten Dinge*

Aus dem Englischen von Michael Haupt. Primus, Darmstadt 2011. 176 S., € 29,90

George M. Whitesides ist einer der führenden Nanotechnologie-Experten, Felice C. Frankel eine renommierte Wissenschaftsfotografin. Die Bilder sind zum Teil fantastisch: Winzige Polymerfinger unter dem Elektronenmikroskop scheinen nach kleinen Kunststoffkugeln zu greifen; zwei Wasserstrahlen prallen zusammen und bilden blattartige Fließstrukturen. Doch das sind die Sahnehäubchen: Oft gelingt es nicht, den Inhalt des Texts im Bild aufzufangen. Die Fotografie eines gläsernen Apfels, dem durch Nachbearbeitung ein würfelförmiger Schatten verpasst wurde, kann die Paradoxien der Quantenmechanik nicht wirklich veranschaulichen. In der deutschen Übersetzung finden sich ungewöhnliche Begriffe wie »Selbstassemblierung«; und ausgerechnet auf dem Buchtitel ist im Namen des Autors ein Schreibfehler. Ein nettes Buch – mit kleinen Schönheitsfehlern. JANINA FISCHER



Richard David Precht

***Warum gibt es alles und nicht nichts?** Ein Ausflug in die Philosophie*

Goldmann, München 2011. 208 S., € 16,99

Dieses Buch ist so etwas wie eine Kinderausgabe von »Wer bin ich, und wenn ja, wie viele?« (Spektrum der Wissenschaft 8/2008, S. 100). Der Philosoph und – inzwischen – Bestsellerautor Richard David Precht wandert mit seinem Sohn Oskar durch Berlin und findet an vielen Stellen Anlässe zum Philosophieren. Bei den Flughunden im Tierpark Friedrichsfelde liegt die berühmte Frage von Thomas Nagel nahe, »wie es ist, eine Fledermaus zu sein«. Dagegen wirkt das viel zitierte moralische Dilemma »Soll man die Weiche stellen, damit der außer Kontrolle geratene Güterzug nur einen an Stelle von fünf Menschen umbringt?« ausgerechnet im neuen Berliner Hauptbahnhof, wo es gar keine Rangiergleise gibt, etwas an den Haaren herbeigezogen. Einerlei: Precht liefert eine Blütenlese der heutigen Philosophie, endlich mal ohne Platon, dafür mit langen Exkursen in die Verhaltensforschung, in kindgerechter, gleichwohl auch für Erwachsene durchaus eingängiger Sprache. CHRISTOPH PÖPPE

David Eagleman

***Inkognito.** Die geheimen Eigenleben unseres Gehirns*

Aus dem Englischen von Jürgen Neubauer. Campus, Frankfurt am Main 2012. 328 S., € 24,99

Unter den vielen populärwissenschaftliche Büchern, die Laien eine Einführung in die moderne Hirnforschung vermitteln möchten, ist dieses eins der besseren. David Eagleman, Neurowissenschaftler aus Houston, erläutert die bekannten Sachverhalte anschaulich und unterhaltsam, oft an Alltagsphänomenen: die große Bedeutung des Unterbewussten, faszinierende Sinnestäuschungen, Kuriositäten aus der Neurologie à la Oliver Sacks. Letztere leiten nahtlos über zu den brisanten Fragen nach freiem Willen und strafrechtlicher Schuld, wie sie seit einigen Jahren im Licht der Hirnforschung diskutiert werden. Eagleman argumentiert gegen das konventionelle Schuldverständnis und schlägt ein »präfrontales Training« als biologische Rehabilitationsmaßnahme für Straftäter vor. Die recht tief greifende Erörterung solcher juristischer Folgen neurowissenschaftlicher Erkenntnisse hebt das Buch denn auch von den vielen anderen seiner Art ab. HARTWIG HANSER

Prozent davon werden zu »blauem Wasser«, das als Fluss-, See- oder Grundwasser der Landwirtschaft zur Verfügung steht. Dazu kommt ungefähr einmal pro Jahrzehnt eine extreme Dürre, die gerade in ertragsschwachen Gebieten zu vollständigen Ernteausfällen führt. Auch ohne Dürre ist die Wasserbeschaffung für die Menschen in trockenen Regionen sehr belastend, vor allem für Frauen und Mädchen, die täglich mehrere Stunden damit verbringen, Wasser aus weit entfernten Gebieten zu holen.

Hier versprechen aktuelle Projekte zur besseren Versorgung und effizienteren Nutzung Abhilfe. Je nach Region bietet es sich beispielsweise an, Nebelwasser mit Netzen zu gewinnen oder Grundwasser hochzupumpen. Einfache Mittel wie Sickerschächte, Dämme oder Regenrinnen können gerade in ertragsschwachen Regionen große Fortschritte erzielen. Immerhin steigt der Ertrag einer Nutzpflanze proportional zur verfügbaren Menge an Wasser, solange dies die einzige knappe Ressource ist. Und zum besseren Timing der Bewässerung kann man den Bauern über Internet oder Telefon die aktuellen, aus Satellitenaufnahmen bestimmten Bodenfeuchtigkeitswerte mitteilen.

Es gibt viele gute Ideen für eine ertragreiche und nachhaltige Landwirtschaft der Zukunft. Das klingt schon fast nach einem Happy End; aber noch ist viel zu tun, bis die guten Ideen bei den Bauern ankommen und für sie realisierbar werden.

Indem die Autoren die Fakten in Geschichten aus dem Alltag der Betroffenen einbetten, lassen sie den Leser begreifen, wo die Probleme liegen, anstatt nur abstrakte Thesen aufzulisten. Das etwas ungute Gefühl, das sich beim Lesen bisweilen einstellt, ist sicher gewollt. Gleichzeitig zeigen die Autoren aber auch in jedem Kapitel Auswege, in der Hoffnung, dass die Industrieländer, die ja die Hauptverantwortung für den Klimawandel tragen, ihre moralische Verpflichtung den ärmeren Ländern gegenüber einlösen, da diese am meisten unter den Folgen der klimatischen Veränderungen leiden.

Janina Fischer

Die Rezensentin ist promovierte Chemikerin und Wissenschaftsjournalistin in Mainz.

Siegfried Bär
Der Untergang des Hauses Rascher
Ein Dokumentarroman
Selbstverlag, Freiburg 2011, zu beziehen über amazon.de oder laborjournal.de. 529 S., € 15,–

ZEITGESCHICHTE

Der Massenmörder und der Kartoffelbrei

Eine Biografie über einen der grausamsten NS-Verbrecher scheitert an dem Versuch, komisch zu sein.

Genau genommen ist der Mediziner Sigmund Rascher (1909–1945) ein Opfer des NS-Regimes. Kurz vor Kriegsende wurde er im Konzentrationslager Dachau erschossen, allem Anschein nach auf telefonischen Befehl aus München. Warum und auf wessen Betreiben, ist nicht überliefert.

Wie er in die Fänge der SS geriet, ist allerdings bekannt – und eine überaus bizarre Geschichte. Seine Frau Caroline (»Nini«) hat die vier Knaben, die sie als ihre Söhne aufzog, nicht geboren, sondern ihren leiblichen Müttern abgekauft oder mit List und Tücke weggenommen. Zweimal hat sie sogar, als ihr wegen dieser Taten Ungemach drohte, ein Baby zurückgegeben und sich ein anderes als Ersatz beschafft. Den ermittelnden Kriminalpolizisten erschien die Vorstellung, dass Nini ihrem eigenen Ehemann vier Schwangerschaften erfolgreich vortäuschen konnte, so abwegig, dass sie ihn für einen Mittäter hielten und in Haft nahmen.

Für ein Strafverfahren reichten die Beweise nicht aus. Aber anscheinend diente sich Rascher Anfang 1945 während seiner Odyssee durch verschiedene Gefangenenlager einem britischen Mitgefangenen für die Zeit nach dem Krieg als wissenschaftlicher Mitarbeiter an. Das kam vermutlich durch eine Spionin höheren Stellen zu Ohren, die es als Hochverrat interpretierten.

Derselbe Mann, der sich von seiner Frau zum Trottel machen ließ, dem nach allen Quellen »Gutmütigkeit und eine überdurchschnittliche Hilfsbereitschaft« zu bescheinigen ist und der heute »ein beliebter Arzt der alternativen Szene geworden« wäre, war einer der schlimmsten Massenmörder der Nazizeit. Ausgerechnet in Dachau, wo er später selbst umgebracht wurde, unternahm er an Häftlingen wissenschaftliche Versuche zu den Wirkungen von Unterdruck in (simulierten) großen Flughöhen. Dabei brachte er seine Versuchspersonen qualvoll zu Tode und sezierte sie eine halbe Stunde später, um die tödlichen Luftembolien zu dokumentieren. Andere setzte er der Kälte aus, bis ihre Arme und Beine stocksteif gefroren waren, und erprobte verschiedene Methoden der Wiedererwärmung; auch von diesen Versuchen endeten viele tödlich. Die geforderte Geheimhaltung der Experimente erwies sich als schwierig, weil die Unterkühlten vor

Sigmund Rascher mit dem untergeschobenen Sohn Peter (Porträt von Rebecca Tehrani nach einer Fotografie)

Schmerzen so laut brüllten, dass es durch das ganze Lager schallte.

Die schiere Anzahl der Opfer Raschers, schätzungsweise 200, verblasst gegenüber den Todesraten von Auschwitz, wo täglich 20-mal so viele Menschen vergast wurden. Dennoch neigt man dazu, dem Arzt, der seine Opfer mit hohem persönlichem Einsatz und mit großer Grausamkeit im Namen der Wissenschaft zu Tode brachte, einen viel übleren Charakter zuzuschreiben als den Beteiligten der Mordmaschine in den Vernichtungslagern.

Es gibt also genug Anlass, das Leben Sigmund Raschers genau unter die Lupe zu nehmen – und reichlich Material dafür: Seine mörderischen Menschenversuche sind nach dem Krieg im »Ärzteprozess«, einem der Nürnberger Prozesse, ausführlich zur Sprache gekommen; seine Korrespondenz mit seinem Förderer Heinrich Himmler, dem »Reichsführer SS«, ist ebenso erhalten geblieben wie sein privater Briefwechsel, die Akten des Strafverfahrens wegen des Kinderraubs sowie die Äußerungen etlicher Zeitzeugen.

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

Der Biochemiker und Herausgeber des »Laborjournals« Siegfried Bär, bürgerlich Hubert Rehm, hat diesen Berg an Dokumenten überaus gründlich durchgearbeitet, weitere umfangreiche Recherchen unternommen und das Ergebnis im vorliegenden Werk zusammengefasst. Gegenüber der ersten Version von 2006 hat es seinen Umfang reichlich verdoppelt. Mit vielen, teilweise sehr langen Zitaten gelingt es ihm, das Leben Sigmund Raschers in großer Detailtreue nachzuzeichnen.

Wie erklärt es sich, dass dieser nette, kleine Mediziner zum Massenmörder wurde? Nach reichlich 500 Seiten ist das ernüchternde Ergebnis: gar nicht. Herkunft aus dem deutschen Bildungsbürgertum; Scheidung der Eltern mit anschließendem, relativ mildem Familienzwist? Viel zu gewöhnlich, um für diese außerordentliche Verbrecherkarriere als Erklärung herzuhalten. Der Einfluss der Ehefrau mit ihrer besonderen Beziehung zu Himmler? In Bärs Darstellung erscheint sie raffgierig, intrigant und verlogen. Aber ausgerechnet den mehrfachen Kinderraub beging sie, um ihren geliebten Sigmund an sich zu binden, und mit dessen mörderischer Berufstätigkeit hatte sie offensichtlich nichts zu tun. Anthroposophische Neigungen in der Familie? Bär nutzt diese Tatsache, um die Anthroposophie mit Hohn und Spott zu übergießen; aber sie hat mit der Nazi-Ideologie nicht mehr gemein als das deutsche Bildungsbürgertum insgesamt.

Rascher ging allerdings bei dem Anthroposophen Ehrenfried Pfeiffer (1899–1961) in die Lehre und praktizierte dessen Verfahren der Kupferchloridkristallisation – mit Erfolg, wie Pfeiffer selbst ihm bescheinigte. Nun kann man nach allgemeiner Überzeugung aus der Gestalt der Kristalle nichts von den »Lebenskräften« herauslesen, die in den der Kupferchloridlösung beigefügten Substanzen stecken sollten. Mit gutem Grund vermutet Bär daher, diese Beschäftigung habe Raschers wissenschaftliche Maßstäbe für sein Leben verdorben.

In der Tat war Rascher ein schlechter Wissenschaftler. Es fehlte ihm an eigenen Ideen; statt sich auf ein Projekt zu konzentrieren, verzettelte er sich in Geschäftigkeit. Seine Fachkollegen hielten nicht viel von seiner Arbeit – aber nicht etwa, weil er dabei massenhaft Menschen umbrachte, sondern weil er seine Morde nicht wissenschaftlich korrekt dokumentierte und auswertete. Am Ende entzogen sie ihm die Ressourcen für seine Experimente. Darauf suchte Rascher fieberhaft neue Betätigungsfelder – und nahm, was er kriegen konnte, unter anderem die Idee eines Dachauer Häftlings für einen Kartoffelbrei, der wegen besonderer Nahrhaftigkeit, Haltbarkeit oder aus welchen Gründen auch immer den Endsieg befördern sollte.

Warum also quälte Sigmund Rascher im Namen der Wissenschaft mehrere hundert Menschen zu Tode? Weil er dazu Gelegenheit hatte und ihm nichts Besseres einfiel. Damit ist seine Geschichte ein weiterer Fall der »Banalität des Bösen«, die Hannah Arendt am Beispiel Adolf Eichmanns, des bürokratischen Planers der Judenvernichtung, so wirkungsvoll in Worte gefasst hat.

Siegfried Bär hat mit seiner Materialsammlung ein höchst verdienstvolles Werk getan – und es durch seine Darstellung verdorben. Zum einen nahm er allzu viel Belangloses mit ins Buch auf; zum anderen versucht er, die Geschichte durch einen ironisch-besserwisserischen Stil, fiktive Zitate auf Schwäbisch (Sigmund Rascher) beziehungsweise Bayrisch (Nini) und einige – angeblich sehr wenige – hinzugefügte Details wenigstens ein bisschen lustig zu machen. Das misslingt. Da hilft auch nicht, dass er sich dem Anspruch, der an eine Biografie zu stellen ist, listig mit dem Untertitel »Dokumentarroman« entzieht.

Ja, es ist zweifellos schwer, angesichts der grausigen Fakten das Gleichgewicht zwischen Einfühlen in die Hauptperson und kritischer Distanz zu wahren. Aber Siegfried Bär hätte es wenigstens versuchen sollen.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Andrew Stanton (Regie)
John Carter
Zwischen den Welten
Nach dem Roman »A Princess of Mars« von Edgar Rice Burroughs
Mit Taylor Kitsch und Lynn Collins
Walt Disney Studios Motion Pictures Germany, München.
Kinostart: März 2012. Freigegeben ab zwölf Jahren.
3-D, 130 Minuten

FANTASYFILM

Trubel auf dem Mars

Die Disney-Studios haben eine 3-D-Weltraumoper im Retrolook produziert.

Angelsächsische Schauspielernamen können in fremden Ohren komisch klingen. Johnny Depp zum Beispiel – aber der spielt so gut, dass niemand an einen Deppen denkt. Der Heldendarsteller des neuen Fantasyfilms aus dem Hause Disney läuft da größere Gefahr. Er heißt Taylor Kitsch.

Der langhaarige, topfit trainierte Muskelmann mimt John Carter, einen Soldaten der Konföderierten im Amerikanischen Bürgerkrieg, der nach der Niederlage der Südstaaten genug vom Militär hat. Auf der Suche nach Gold gerät der Abenteurer an ein Medaillon der Marsmenschen, das ihn auf deren Heimatplaneten teleportiert. Dort kommt ihm die geringere Schwerkraft zugute: Er kann ungemein große Sprünge machen und besiegt mit seinem durch Erdschwere gestärkten Körperbau ohne Weiteres vierarmige Marsmenschen. Unterwegs verliebt er sich in eine attraktive Marsprinzessin, greift erneut zu den Waffen und sorgt für den Sieg der guten Marsianer über die bösen.

Die Geschichte stammt vom Amerikaner Edgar Rice Burroughs (1875–1950), hier zu Lande vor allem als Erfinder des adeligen Dschungelmenschen Tarzan bekannt. Noch vor den Tarzanromanen veröffentlichte er 1917 »A Princess of Mars«, hatte damit Erfolg und schrieb zehn Fortsetzungen. Burroughs' Marsromane haben Sciencefiction-Autoren wie Robert A. Heinlein, Arthur C. Clarke und Ray Bradbury inspiriert; James Cameron erzählt in seinem 3-D-Film »Avatar« im Wesentlichen dieselbe Geschichte in modernisiertem Sciencefiction-Gewand. Im

ANZEIGE

chrismon plus
Das evangelische Magazin

Zum Nachdenken,
Weiterdenken und Miteinanderreden.

Jeden Monat Geschichten über Menschen in außergewöhnlichen Situationen, hintergründige Reportagen und fundierte Kommentare.

3 Hefte lesen Sie kostenlos.

Unser Dankeschön für Sie, wenn Sie nach dem Test chrismon plus weiterlesen: ein Jahreslos der Aktion-Mensch-Lotterie.

Bestellen Sie jetzt:

Telefon **0800 / 7587537,** E-Mail **leserservice@chrismon.de,** oder im Internet unter **www.chrismon.de/testen**

Auf dem Mars bewegt man sich mit Luftschiffen fort (oben). Der Kampf des Helden gegen eine Kreuzung aus Affen und Eisbären (links) erinnert stark an den Film »Gladiator«.

deutschen Sprachraum erinnert der Plot unweigerlich an Karl May: Ein Bleichgesicht stolpert in eine fremde Kultur, verschafft sich durch Kampfstärke – als »Old Shatterhand« hier, als Weitspringer da – bei den Einheimischen Respekt, steigt zum Anführer auf und bewährt sich als Retter in der Not.

Wie »Avatar« ist »John Carter« ein tricktechnisch aufwändiger 3-D-Film. Was ist diesmal anders? Den Unterschied macht erstens die Vorlage, zweitens Disney.

Burroughs' Roman ist keine Sciencefiction, sondern pure Fantasy. An der Frage, wie man zum Mars gelangt und ob es sich dort überhaupt leben lässt, hatte der Autor kein Interesse. Er suchte Spielraum für ein Abenteuer mit fantastischen Lebewesen in exotischer Szenerie. Darin sind ihm die Disney-Studios offenbar gern gefolgt. Regisseur Andrew Stanton hat zuvor Oscars für die optisch eindrucksvollen Trickfilme »WALL-E« und »Findet Nemo« erhalten, und visuelle Fantasie ist auch die Stärke von »John Carter«.

Der utopische Mars ähnelt auffallend den Nationalparks im US-Bundesstaat Utah, wo die Außenaufnahmen gedreht wurden: nackte Steinwüsten, weite Horizonte, atemberaubende Felsnadeln und tief eingegrabene Canyons. Darin tummeln sich per Computertrick vielerlei Fabelwesen, die sich vor allem durch die große Anzahl ihrer Gliedmaßen auszeichnen. Ein typischer Disney-Einfall ist ein vielbeiniges, hundeähnliches Tier, ein rasend schnell dahinkeuchendes Gemisch aus Mops und Kröte, das zwischendurch für Heiterkeit sorgt.

Schön ausgedacht sind die Flugmaschinen der Marsianer, die mit Sonnenenergie angetrieben werden und riesige Vogelflügel schwingen (Bild oben). Auch die unterschiedlichen Architekturen der Marsbewohner machen sich gut in den weiträumigen Landschaftsprospekten. Und das Brautkostüm der Marsprinzessin ist so raffiniert geschneidert, dass es für eine kirchliche Hochzeit auf der Erde nicht in Frage käme.

Mit solchen optischen Vorzügen kann »John Carter« durchaus punkten. In den besten Momenten ähnelt der Film einem verrückt querfeldein preschenden Roadmovie ohne Straße und Fahrzeug – nichts als pure Bewegung durch Traumgefilde. Leider stören immer wieder saudumme Dialogzeilen aus der untersten Klischeeschublade. Auch ödet der unweigerlich mit dem Niedermetzeln der Bösen endende Showdown arg an. Dass das Abschlachten von Außerirdischen einer Freigabe ab zwölf Jahren nicht entgegensteht, erscheint besonders fragwürdig.

Michael Springer

Der Rezensent ist Physiker und ständiger Mitarbeiter von »Spektrum der Wissenschaft«.

Damit aus Neugier Wissen wird.

Für alle Wissbegierigen zwischen 10 und 14 Jahren, die nicht nur das »Was«, sondern auch das »Wie« und »Warum« interessiert, gibt es jetzt ***Spektrum neo***.

In Zusammenarbeit mit dem Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik in Kiel

facebook

Bestellen Sie schon jetzt:

www.spektrum-neo.de

Interplanetarische Mikroorganismen

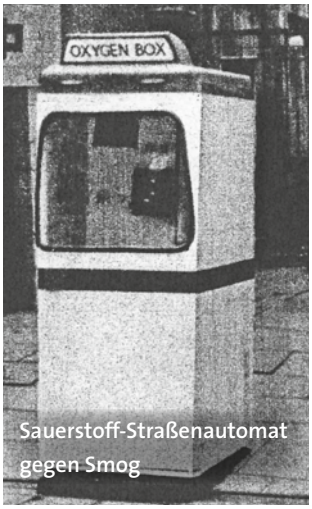
»Die Wirkung des Ultrahochvakuums (unter 10^{-7} Torr) auf Mikroorganismen ist von praktischem Interesse in Verbindung mit Fragen der Raumfahrt. D.M. Portner und Mitarbeiter berichten über ihre Versuche, die sie mit Sporen von Bacillus subtilis und Aspergillus fumigatus sowie mit Zellen von Mycobacterium smegmatis durchführten. Die Sporen- bzw. Zellsuspensionen wurden einem Vakuum von ca. 4×10^{-10} Torr bei 23–24° ausgesetzt. Nach 5 Tagen zeigte sich gegenüber Kontrollorganismen kein Abfall der Lebensfähigkeit. Aus diesen Untersuchungen kann geschlossen werden, daß Mikroorganismen auf nicht sterilisierten Raumschiffen den Transport durch den interplanetarischen Raum überstehen können.« Naturwissenschaftliche Rundschau 4, April 1962, S. 156

Magnetischer Lawinenhund

»Die Hochalpine Forschungsstation Jungfraujoch hat erstmals ein magnetisches Suchverfahren für Verschüttete demonstriert. Die neue Methode besteht darin, dass der Skifahrer und lawinenbedrohte Bergbewohner einen kleinen Magneten auf sich tragen. Dieser ist so bemessen, dass er mit dem neuen Suchgerät auf grössere Entfernung, unabhängig von Temperatur, Luftdruck, Wind- und Schneeverhältnissen, nachgewiesen werden kann. Das Suchgerät bewährte sich ausgezeichnet. In ca. 15 Minuten wurden zwei in zwei bis drei Metern Tiefe vergrabene Männer an die Oberfläche gebracht.« Neuheiten und Erfindungen 318, April 1962, S. 52

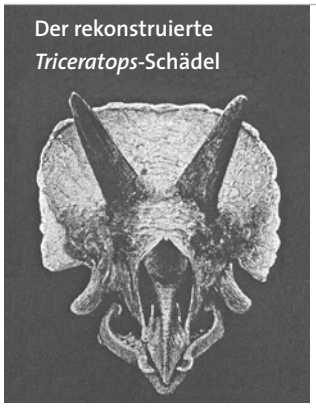
Eine Tüte Luft

»In den Strassen der japanischen Stadt Osaka stehen Automaten, die nach Einwurf einer 10-Yen-Münze zwanzig Sekunden lang Sauerstoff verströmen. Wer Luftmangel verspürt, tritt an einen der Papiertrichter und atmet die frische Luft tief ein.« (Smogbedingt starben 1962 in Osaka vermutlich 30 Personen. *Die Red.*) Populäre Mechanik 79, April 1962, S. 36



Sauerstoff-Straßenautomat gegen Smog

Urige Dickschädel


Der rekonstruierte *Triceratops*-Schädel

»Triceratops ist in einem wunderbaren Exemplare in der großen Halle des Senckenbergischen Museums zu Frankfurt aufgestellt worden. Die Ausmeiselung des Schädels ist eine Glanzleistung des Präparators, der in halbjähriger Arbeit den teilweise sehr zerbrochenen Schädel aus dem Gestein herauspräparierte und das fehlende Vorderteil ergänzte. Er arbeitete nach einem anderen Originalschädel, der, ebenfalls Eigentum des Museums, später aufgestellt werden wird. Beide Schädel wurden im Staate Montana, im Westen von Nordamerika, aufgefunden.« Die Umschau in Wissenschaft und Technik 16, April 1912, S. 334

Waschmaschine für die Straßen

»In einigen Städten Deutschlands werden seit einigen Jahren zur Reinigung der mit Asphalt gepflasterten Fahrdämme elektrisch betriebene Straßenwaschmaschinen benutzt. Für den elektrischen Antrieb hat man sich nach eingehenden Versuchen entschieden, zunächst, weil dieser geruchlos und nahezu geräuschlos arbeitet, sowie, weil der Betrieb eines elektrischen Fahrzeugs wesentlich einfacher ist, wie derjenige eines Benzinfahrzeugs. Ganz besonders ausschlaggebend für den elektrischen Betrieb war es aber, daß er die Möglichkeit bot, die kurze gedrungene Form der Straßenwaschmaschine für Pferdebetrieb beizubehalten und sie auf dem denkbar kleinsten Raum wendbar zu machen.«

Elektrotechnische Zeitschrift 17, April 1912, S. 434

Strom gegen Rheuma

»Wärmewirkungen sind schon für Heilzwecke ausgenutzt worden. Bisher blieb jedoch die zugeführte Wärme in ihrer Wirkung nur auf die Haut und die direkt darunter befindlichen Schichten beschränkt. Jetzt hat man in den neuerdings in der drahtlosen Telegraphie benutzen sog. ungedämpften elektrischen Schwingungen Wechselströme zur Verfügung, die beim Einschalten bis in beliebige Tiefen sehr energische Wärmewirkungen hervorrufen, ohne daß irgendwelche Störungen im Organismus auftreten. Das Verfahren hat besonders in der Behandlung rheumatischer Leiden gute Erfolge gezeitigt.« Technische Monatshefte 4, April 1912, S. 124

FOTOS: AUS ZEITSCHRIFTEN DER FORSCHUNGSBIBLIOTHEK FÜR WISSENSCHAFTS- UND TECHNIKGESCHICHTE DES DEUTSCHEN MUSEUMS

Wie Gerissenes wieder hinreißend wird

LINKS: DEUTSCHES MUSEUM; RECHTS: SUSEMIHL GMBH, FRANKFURT

Die SUMA 55 besteht aus:
1. Maschine
2. Schuko-Stecker mit Zuleitung. (Verwenden Sie bitte eine Schuko-Steckdose, denn Sie vermeiden damit Rundfunkstörungen. Selbstverständlich ist die SUMA ohnehin ordnungsgemäß entstört.)
3. Spiralhalter für 2 Nadeln oder Nadel und Ziehfadengerät. Bei der letzten Serie befinden sich bereits zwei Nadelhalter vorne an der Maschine, so daß bei dieser Ausführung kein besonderer Nadelständer mitgeliefert wird.
4. Repassiernadel mit Verbindungsschlauch.
5. Ziehfadengerät mit Verbindungsschlauch.
6. Fußanlasser mit Kohle-Feinstregulierung.
7. Repassierbecher.
8. SUMA-Koffer (bei Kauf im Preis einbegriffen, bei Miete gegen Berechnung).
9. Diverse Ersatzteile: 2 Motorkohlen, 1 SUMA-Membrane, Verbindungsschlauch.

Als Nylonstrümpfe noch teuer waren, reparierte die SUMA 55 Laufmaschen (rechts: Auszug aus der Bedienungsanleitung).

Welche Frau kennt das nicht? Da zieht man zu hastig die Feinstrumpfhose an oder streift zu nah an einer Kante entlang und hat schon eine Laufmasche. Genauer gesagt: Einer der Fäden wurde durchtrennt, aus denen das Kleidungsstück gestrickt ist; dieser Schaden pflanzt sich dann in einer Kettenreaktion fort. Heutzutage landen die unansehnlich gewordenen Objekte im Müll, noch vor wenigen Jahrzehnten aber war ein Paar Nylonstrümpfe ein Luxusgut. Anfang der 1950er Jahre kosteten sie durchschnittlich sechs Deutsche Mark – dafür musste ein Handwerker damals gut vier Stunden arbeiten. Sie wegwerfen kam also nicht in Frage. Der Schaden wurde stattdessen mit einer Laufmaschen-Hebemaschine behoben, auch Repassiermaschine genannt (abgeleitet vom französischen »repasser« bedeutet repassieren so viel wie »Laufmaschen aufnehmen«). Die Reparatur erledigten Nähstuben und spezialisierte Werkstätten für wenige Pfennige.

Eine solche Maschine machte sich die Schlaufeneigenschaften der Wirkware zu Nutze, denn jede Masche ist in die jeweils vorherige eingehängt. Wenn eine davon reißt, verliert zwar die darunterliegende Masche den Zusammenhalt und das Unglück nimmt seinen Lauf, es lassen sich aber auch neue Maschen in die noch bestehenden Querfäden einhängen. Dazu stülpte eine Repassiererin den Strumpf zunächst über ein becherförmiges Metallstück. Dann setzte sie eine spezielle Nadel an einer noch intakten Masche entlang der aufgetrennten Spur an. Es handelte sich dabei um eine Zungennadel, wie sie in Strickmaschinen zur Fadenführung eingesetzt wird. Über einen kleinen, dünnen Schlauch wurde sie angeblasen und damit in Bewegung gesetzt. Wie eine Häkelnadel ließ sich auf diese Weise ein Faden durch die Masche führen und auf der anderen Seite wieder aufnehmen.

10 bis 15 Minuten benötigte eine erfahrene Repassiererin pro Strumpf, sofern nicht bereits zu viele Maschen gezogen waren. Anschließend vernähte sie das Ende der Laufmasche per Hand, was je nach Größe der Laufmasche und Material des Strumpfs durchaus sichtbar blieb. Die hier abgebildete Strumpf-Reparatur-Maschine SUMA 55 der Firma Susemihl von 1958 wurde mit einem Fußpedal bedient. Zusammen mit Zubehör wie Strumpfgarn und Nadeln fand sie in einem Köfferchen Platz. Die so ausgerüstete Repassiererin war daher mobil und konnte ihre Dienste vielerorts anbieten.

In der DDR war die Reparatur von Nylonstrümpfen und Strumpfhosen bis zur Wende gang und gäbe. Aber auch heute noch bieten Fachbetriebe in Deutschland und Österreich diesen Service an, um besonders hochwertige Kleidungsstücke zu retten.

Die promovierte Biologin **Margherita Lasi** absolvierte ein zweijähriges Volontariat am Deutschen Museum. Seit 2011 ist sie Kuratorin für Life Sciences.

Die Grenzen der Intelligenz

Kann sich das menschliche Gehirn zu einer immer leistungsfähigeren Denkmaschine weiterentwickeln? Wahrscheinlich nicht – denn auf Grund physikalischer Gesetze dürften sich unsere kognitiven Fähigkeiten bereits nahe am evolutionär möglichen Limit bewegen

ADAM VOORHES

KEVIN BROWN, MONDOLITHIC STUDIOS

Die dunkle Seite der Milchstraße

Auf der Suche nach der Dunklen Materie stießen Astronomen auf eine merkwürdige Eigenschaft der Galaxis: ihren verbeulten Rand. Diese bisher unerklärte Deformation könnte zur Klärung eines der großen Rätsel der Kosmologie beitragen

DOMINIK BONATZ

Megalithen im Regenwald

Lange galten die riesigen Steine im Hochland von Sumatra als Zeugnisse einer prähistorischen Kultur, die offenbar nichts mit den Tempeln und Palästen des Tieflands gemein hatte. Nun haben Archäologen entdeckt: Beide Kulturen bedingten einander!

Wasserstoff als Energiespeicher

Aus Wasser oder Gas hergestellt, gespeichert, transportiert und schließlich in Brennstoffzellen zur Stromgewinnung verbrannt – Wasserstoff birgt das Potenzial, drängende Probleme der Energieversorgung zu lösen. Wenn es denn gelingt, bei all diesen Schritten die Kosten zu senken

HIV mit Gentechnik besiegen

Einige Menschen sind gegen HIV-Infektionen gefeit, weil sie ein Rezeptormolekül nicht ausbilden, mit dessen Hilfe das Virus Zellen befällt. Nun erproben Forscher, das betreffende Gen zu zerstören. Die ersten klinischen Studien scheinen Erfolg zu versprechen

NEWSLETTER

Möchten Sie regelmäßig über die Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?

Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:
www.spektrum.com/newsletter

DIE VORTEILE EINES ABONNEMENTS

So vielfältig wie unser Magazin!

1 12 Ausgaben zum Preis von nur € 84,– inkl. Versand Inland (statt € 94,80 im Einzelkauf); für Schüler, Studenten und Azubis auf Nachweis sogar nur € 69,90

2 **2 in 1:** Sie erhalten nicht nur die Printausgabe, sondern können auch schon drei Tage vor dem Erstverkaufstag auf die Digitalausgabe zugreifen!

3 Kostenloser Zugriff auf das Onlineheftarchiv von **Spektrum der Wissenschaft** mit fast 9000 Artikeln

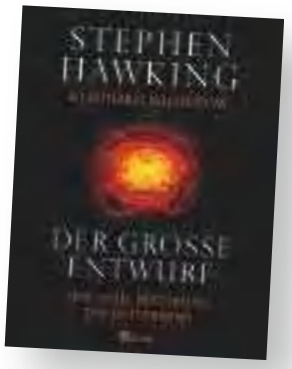
4 Bonusartikel und Gratisdownloads ausgesuchter Sonderhefte im Internet

5 Verbilligter Erwerb des Produkts des Monats

Produkt im April

6 **Zusätzlich für Ihre Abobestellung erhalten Sie ein Präsent Ihrer Wahl!**

Weitere Präsente finden Sie im Internet ...



Um das Universum auf fundamentalster Ebene zu verstehen, müssen wir nicht nur wissen, wie sich das Universum verhält, sondern auch: Warum gibt es etwas und nicht einfach nichts? Warum existieren wir? Das Buch »Der große Entwurf« versucht die Antworten zu geben.

Diese schön gestaltete Tasse erfüllt beim Kaffee- oder Teegenuss einen doppelten Zweck: Sie genießen Ihr Lieblingsgetränk und erlernen gleichzeitig durch das Design der Tasse das Periodensystem der Elemente. Höhe: 105 mm; Inhalt: 460 ml

Der Tintenroller »Rollerball« aus der CERRUTI-Manufaktur verbindet höchste Verarbeitungspräzision und einzigartigen Schreibkomfort mit einem edlen Design. Mit auswechselbarer, schwarzer Mine.

Diese und zusätzliche Aboangebote wie **Geschenkabo**, **Miniabo** oder **Leser-werben-Leser-Abos** finden Sie unter:

www.spektrum.de/abo

Spektrum DER WISSENSCHAFT
WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

online: spektrum.de/abo
E-Mail: service@spektrum.com
Tel.: 06221 9126-743

Fax: 06221 9126-751
mit der Bestellkarte anbei

Thema Nanotechnologie bei Spektrum der Wissenschaft

Neu! ab April

Als PDF direkt in Ihr Postfach

Lassen Sie sich schnell und kompakt über die wichtigsten Erkenntnisse im Bereich Nanotechnologie informieren! »Briefings Nanotechnology« erscheint monatlich digital und in englischer Sprache.

spektrum.com/briefings

SPEKTRUM-SPEZIAL – PHYSIK • MATHEMATIK • TECHNIK 1/2012

»Einblicke in die Nanowelt«

Die Nanotechnologie ist unaufhaltsam auf dem Vormarsch und wird das 21. Jahrhundert prägen. Schon heute hat sie Eingang in unseren Alltag gefunden. Dieses Spektrum-Spezial bietet eine Sammlung wichtiger Artikel zum Thema Nanotechnologie aus »Spektrum der Wissenschaft«, die schlaglichtartig den aktuellen Stand und die Zukunft dieses Gebiets beleuchten – und wie es unser aller Leben beeinflussen wird.

spektrum.de/spezialabo

Themenseite »Nanotechnologie«

Hier finden Sie eine Zusammenstellung der wichtigsten Beiträge aus den Magazinen und Onlineberichten des Verlags rund um das Thema Nanotechnologie.

www.spektrum.de/nano

Spektrum DER WISSENSCHAFT EXTRA

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Klimawandel

Die Herausforderung des 21. Jahrhunderts

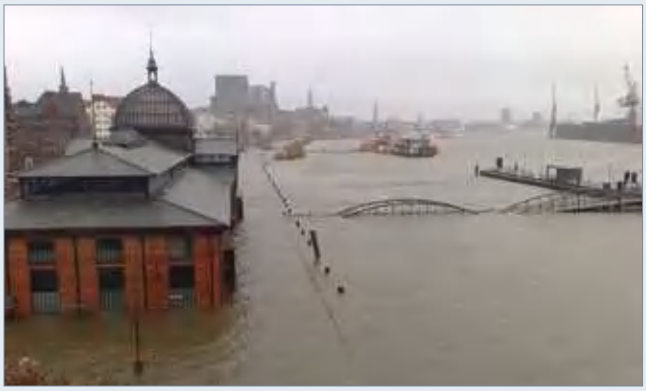
- Deutschland im Treibhaus
- Climate Engineering als letzte Rettung?
- Schutz vor steigenden Fluten

Forum MENSCH NATUR TECHNIK
Eine Kooperation von Spektrum DER WISSENSCHAFT und VolkswagenStiftung

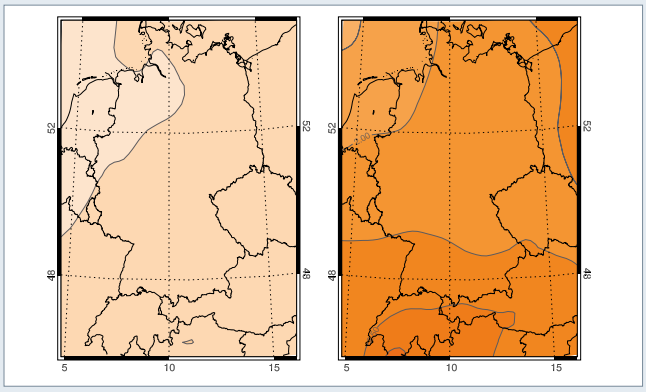
www.spektrum.de/mnt

4 Lässt sich die Erde künstlich kühlen?
Thomas Leisner, Andreas Oschlies und Wilfried Rickels
Angesichts steigender CO_2-Emissionen gewinnen Vorschläge an Bedeutung, der Erderwärmung durch gezielte Eingriffe in das Klimasystem entgegenzuwirken. Wie realistisch sind sie, und welche Probleme werfen sie auf?

INTERVIEW
12 »Der Himmel wäre nie mehr blau«
Konrad Ott von der Universität Greifswald erörtert die ethischen Aspekte des Climate Engineering



14 Klimawandel und Küstenschutz
Horst Sterr
Im Zuge der Erderwärmung steigt der Meeresspiegel. Besonders bedrohlich ist das für tief liegende Deltaregionen wie in Bangladesch und Vietnam sowie für Inselstaaten. Aber auch auf Deutschland kommen beträchtliche Herausforderungen zu



19 Wie hart trifft es Deutschland?
Paul Becker, Thomas Deutschländer und Florian Imbery
Wie hart wird der Klimawandel die Bundesrepublik treffen? Regionale Klimamodelle geben darüber inzwischen recht detailliert Auskunft. Demnach werden die Sommer heißer und die Winter feuchter – und die Gefahr extremer Niederschläge nimmt zu

24 Wärmeinseln im Treibhaus
K. Heinke Schlünzen
Städte haben ihr eigenes Klima. Deshalb ist wichtig zu wissen, wie sich die globale Erwärmung hier speziell auswirken wird – auch im Hinblick darauf, wie Städteplaner sich schon heute darauf vorbereiten sollten

DREAMSTIME / DAVIS2247

TITELMOTIV: FOTOLIA / JAN WILL

Gerhard Trageser
Redaktionsleiter

Gegensteuern, anpassen oder herumdoktern?

Solange es nicht gelingt, den Ausstoß von Kohlendioxid weltweit zu senken, schwebt über der Erde das Damoklesschwert eines verhängnisvollen Klimawandels. Doch alle Anstrengungen, zu einer bindenden internationalen Vereinbarung zu kommen, waren bisher vergeblich. Das ist umso fataler, als das Klimasystem erst mit einer Verzögerung von Jahrzehnten auf veränderte Randbedingungen reagiert. So könnte es geschehen, dass der Menschheit demnächst keine Wahl bleibt, als sich drastisch veränderten Klimabedingungen, anzupassen – so gut es eben geht.

Wir Deutsche sind in der vergleichsweise komfortablen Lage, dass der Klimawandel bei uns keine wirklich verheerenden Auswirkungen haben wird (S. 19). Unsere Sommer dürften heißer und trockener, die Winter milder und feuchter werden. Misslicher ist die mutmaßliche Zunahme von Extremereignissen wie Starkregenfällen und schweren Stürmen. Auch könnte sich die Zahl der Tage, an denen das Quecksilber die 30-Grad-Marke überspringt, bis Ende des Jahrhunderts verdreifachen. Darunter werden vor allem Städte zu leiden haben, die auch bisher schon Wärmeinseln sind (S. 24).

Eine der größten Bedrohungen durch die Erderwärmung ist der Anstieg des Meeresspiegels (S. 14). Er gefährdet einige Länder in ihrer schieren Existenz. Aber auch in Deutschland nimmt die Wahrscheinlichkeit schwerer Sturmfluten zu, wogegen nur höhere Deiche helfen. Doch retten sie das Wattenmeer nicht, und der zu erwartende Verlust von Stränden wird auch den Küstentourismus hart treffen.

In dem Maß, wie die Weltgemeinschaft bei der Klimarettung versagt, reifen Blütenträume einer künstlichen Kühlung der Erde (S. 4). Die Vorschläge sind teils abenteuerlich – wie die Installation riesiger Sonnenschirme im All. Die meisten wären wohl kostspieliger als eine Senkung der Kohlendioxidemissionen. Vor allem aber treiben sie den Teufel mit Beelzebub aus. So brächte der Eintrag von Sulfataerosolen in die Stratosphäre den sauren Regen zurück, und ein blauer Himmel würde für immer der Vergangenheit angehören (S. 12). Durch die großflächige Düngung von Ozeanen mit Eisen, um über künstliche Algenblüten der Atmosphäre Kohlendioxid zu entziehen, könnte das gesamte marine Ökosystem aus dem Gleichgewicht geraten.

In diesem Spektrum Extra, das in enger Kooperation mit der VolkswagenStiftung entstanden ist, befassen sich ausgewiesene Fachleute mit den Folgen des Klimawandels speziell für Deutschland und mit den Möglichkeiten, sie zu bewältigen oder abzumildern. Die meisten Autoren wirken auch an dem diesjährigen Forum »Mensch Natur Technik« (siehe Kasten) in Hannover mit. Das detaillierte Programm der drei Abende finden Sie unter www.spektrum.de/mnt.

Herzlich Ihr

Gerhard Trageser

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Forum MENSCH NATUR TECHNIK 2012

VolkswagenStiftung

Klimamodelle – Wie berechenbar ist die Zukunft?
11.4.2012, 19.00 Uhr, Landesfunkhaus Niedersachsen, kleiner Sendesaal, Hannover
Mit Prof. Dr. Mojib Latif, Dr. Gabriele Gramelsberger, Dr. Paul Becker und Dr. Thorsten Mauritsen
Moderation: Dr. Reinhard Breuer

Geo-Engineering – Wem gehört das Wetter?
11.10.2012, 19.00 Uhr, Landesfunkhaus Niedersachsen, kleiner Sendesaal, Hannover
Mit Prof. Dr. Werner Aeschbach-Hertig, Prof. Dr. Konrad Ott, Prof. Dr. Ulrich Bathmann, Dr. Franz May und Prof. Dr. Sabine Schlacke
Moderation: Dr. Daniel Lingenhöhl

Anpassung unter Unsicherheit – Sind wir auf den Klimawandel vorbereitet?
11.12.2012, 19.00 Uhr, Landesfunkhaus Niedersachsen, kleiner Sendesaal, Hannover
Mit Prof. Dr. Heinke Schlünzen, Prof. Dr. Beate Ratter, Prof. Dr. Richard Pott, Prof. Dr. Horst Sterr
Moderation: Dr. Carsten Könneker

Lässt sich die Erde künstlich kühlen?

Eigentlich ist die Mission klar: Wir müssen den weltweiten Kohlendioxidausstoß begrenzen. Doch politisch lässt sich das Ziel womöglich nicht realisieren. Könnten wir der Erderwärmung stattdessen durch gezielte Eingriffe in das Klimasystem entgegenwirken?

Von Thomas Leisner, Andreas Oschlies und Wilfried Rickels

Dass der Mensch den Strahlungshaushalt der Erde beeinflusst, ist nichts Neues. Bis vor zwei Jahrhunderten geschah das aber praktisch nur durch Veränderung der Landoberflächen, und die Auswirkungen waren so gering, dass sie sich kaum von natürlichen Klimaschwankungen abhoben. Das änderte sich jedoch mit der industriellen Revolution. Von nun an gelangte durch die zunehmende Nutzung fossiler Brennstoffe, die zur Energiegewinnung verfeuert wurden, rasch immer mehr Kohlendioxid (CO_2) in die Atmosphäre. Parallel dazu kam es zu einem rapiden Bevölkerungswachstum, das mit einer Intensivierung der Landwirtschaft einherging. Durch die vermehrte Nutzviehhaltung und die künstliche Düngung stiegen vor allem die Emissionen von Methan (CH_4), aber auch die von Lachgas (N_2O) an.

Diese Entwicklung setzt sich bis heute fort, und es gibt kaum Anzeichen für eine Trendwende. Als Folge nehmen die Konzentrationen der drei Gase in der Atmosphäre weiter zu, wo sie die Wärmestrahlung in den unteren Luftschichten zurückhalten. Dadurch heizen sie die Erde allmählich auf. Der resultierende Klimawandel ist durch Messungen der globalen Luft- und Ozeantemperatur, der Schnee- und Eisbedeckung sowie des Meeresspiegels inzwischen klar belegt.

Da Kohlendioxid ein sehr stabiles Molekül ist, beträgt seine mittlere Verweilzeit in der Atmosphäre mehrere Jahrhunderte bis Jahrtausende. Es wird nur sehr langsam über den Gasaustausch mit dem Ozean, durch fotosynthetische Umwandlung in Biomasse und beim Verwittern von Gestein wieder aus der Luft entfernt. Deshalb lässt sich ein von CO_2 verursachter Klimawandel nicht einfach durch eine Senkung der Kohlendioxidemissionen rückgängig machen. Methan ist dagegen chemisch sehr viel instabiler und wandelt sich in der Atmosphäre innerhalb von etwa einem Jahrzehnt in Kohlendioxid und Wasser um. Lachgas bleibt zwar etwa zehnmal so lange in der Lufthülle, liegt aber in deutlich geringeren Konzentrationen vor. Aus diesem Grund fokussiert sich die langfristige Klimapolitik vor allem auf das CO_2.

Ab wann der Temperaturanstieg gefährliche Ausmaße annimmt, lässt sich wissenschaftlich nicht eindeutig festlegen. Auf politischer Ebene gibt es Bestrebungen, die Erderwärmung auf zwei Grad Celsius zu begrenzen. Dazu müsste es al-

AUF EINEN BLICK

RISKANTES DREHEN AN DER KLIMASCHRAUBE

1 Prinzipiell lässt sich das **Erdklima** mit einer Reihe von Methoden gezielt beeinflussen, die entweder das einfallende Sonnenlicht abschwächen oder der Atmosphäre Kohlendioxid (CO_2) entziehen.

2 Technisch am leichtesten realisierbar wäre die Injektion von **Sulfataerosolen** in die **Stratosphäre**, die einen Teil der Sonnenstrahlung ins All zurückstreuen. Eine andere Möglichkeit bestünde darin, Ausmaß und Art der **Bewölkung** zu manipulieren. Auch die **Albedo (Reflexivität)** der Erdoberfläche ließe sich erhöhen – etwa durch Erzeugen winziger Luftbläschen an der Meeresoberfläche.

3 All diese Maßnahmen müssten jedoch über Jahrhunderte fortgeführt werden und hätten teils **unkalkulierbare Nebenwirkungen**. So würden Aerosole in der Stratosphäre den Himmel dauerhaft eintrüben und ebenso wie die Manipulation der Bewölkung die regionalen **Niederschlagsmuster** beeinflussen.

4 Die Senkung der atmosphärischen CO_2-Konzentration scheint am ehesten durch **Eisendüngung der Ozeane** möglich. Sie würde das **Algenwachstum** anregen und so die Aufnahme von Kohlendioxid durch das Meer beschleunigen. Ihre **ökologischen Auswirkungen** lassen sich derzeit aber nicht abschätzen.

5 Denkbar, wenngleich technisch aufwändig, wäre auch, die natürliche **Verwitterung** unter Verbrauch von CO_2 anzukurbeln oder das **Treibhausgas** chemisch aus der Luft zu filtern. Beide Maßnahmen bieten jedoch keinen Kostenvorteil gegenüber einer Verringerung des Kohlendioxidausstoßes.

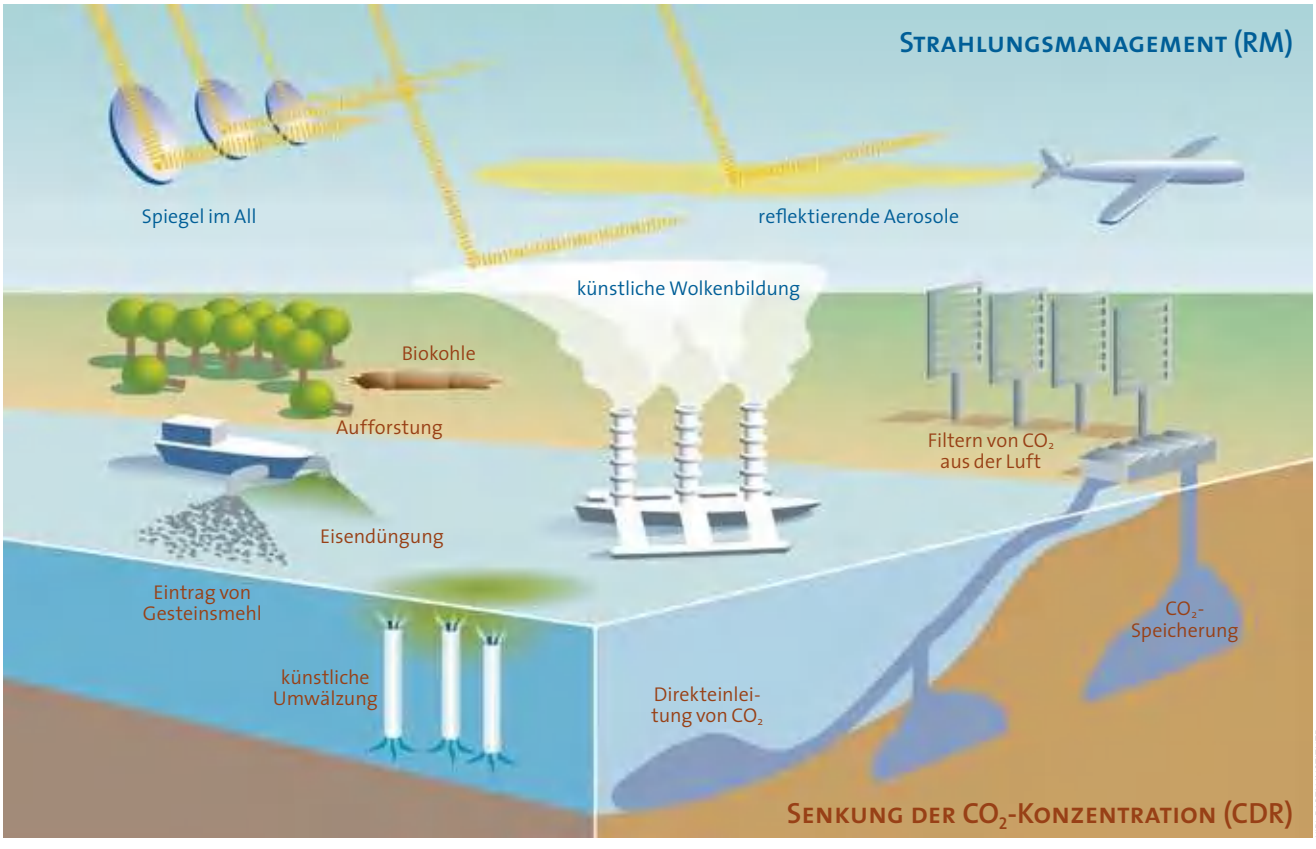
lerdings gelingen, die globalen CO_2-Emissionen in den nächsten zwei bis vier Jahrzehnten zu halbieren. Von diesem Ziel sind wir trotz internationaler Anstrengungen noch immer weit entfernt. Angesichts dessen gewinnen Vorschläge an Bedeutung, das Klima mit technischen Maßnahmen gezielt zu beeinflussen, um so der Erwärmung entgegenzuwirken.

Ein solches »Climate Engineering« erscheint auf den ersten Blick als viel sprechender Ausweg. Im Gegensatz zur Emissionskontrolle wäre kein weltweiter Konsens erforderlich: Einzelne oder einige wenige Staaten könnten den Klimawandel vielmehr im Alleingang eindämmen. Der US-Ökonom und Wirtschaftsnobelpreisträger Thomas C. Schelling sah im Climate Engineering deshalb 1996 geradezu eine Verheißung. Mittlerweile haben sich die ersten Einschätzungen jedoch als allzu optimistisch herausgestellt, weil sie zahlreiche gesellschaftliche, wirtschaftliche und politische Aspekte nicht hinreichend berücksichtigten. Wie man heute weiß, gibt es keine einfache und kostengünstige technische Lösung für das Problem des Klimawandels. Dennoch könnten einige Verfahren des Climate Engineering durchaus einen Beitrag zum globalen Klimaschutz leisten. Allerdings greifen die verschiedenen Technologien auf sehr unterschiedliche Weise in das Klimasystem ein und haben damit auch unterschiedliche Risiken und Nebenwirkungen.

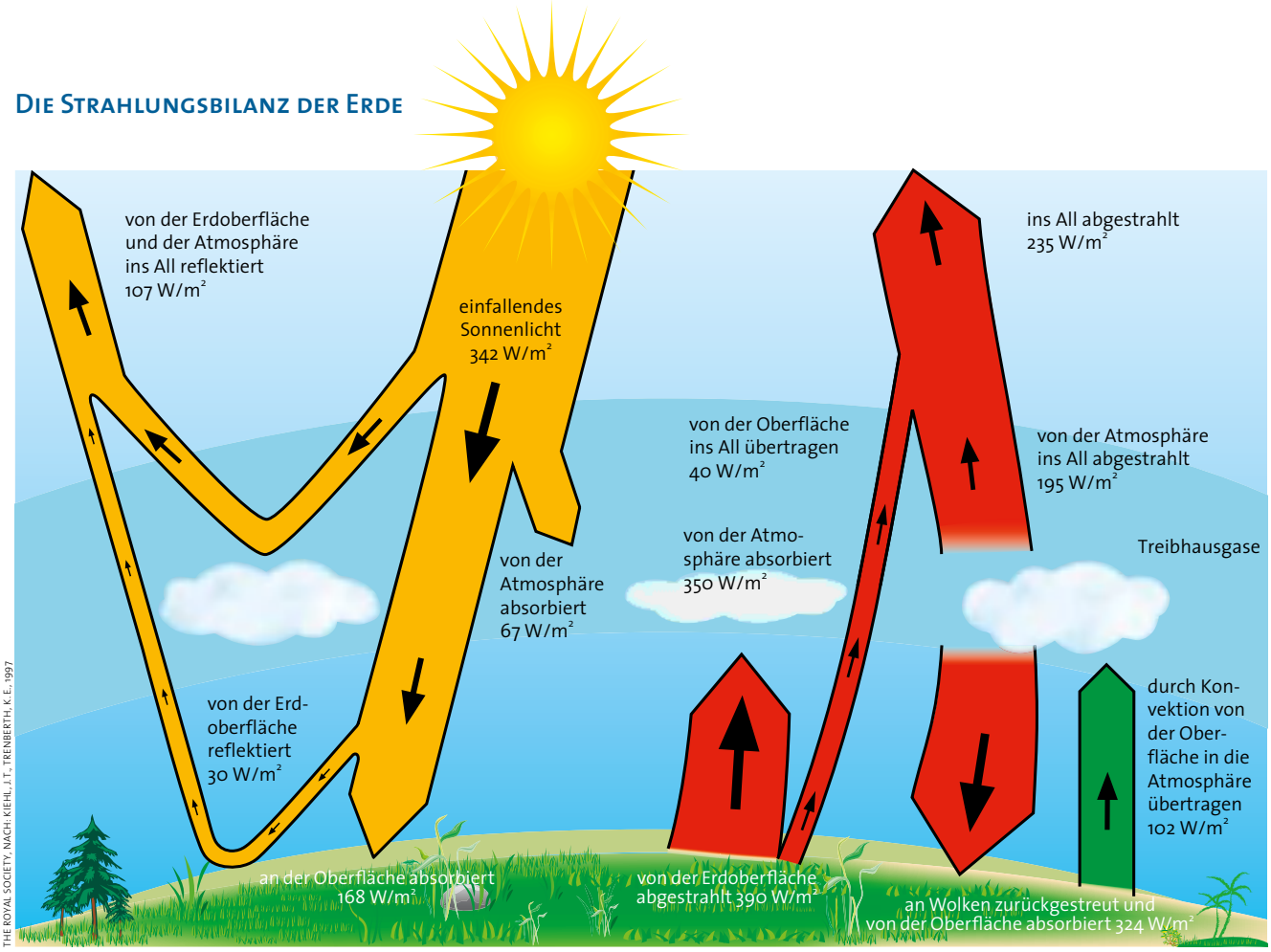
Vereinfacht gesagt, sind drei Größen für die Erdtemperatur maßgeblich: die einfallende Sonnenstrahlung (Solarkonstante), deren Reflexion (Albedo) und die Absorption der langwelligen Wärmestrahlung von der Erdoberfläche (Treibhauseffekt). Die Solarkonstante beträgt ziemlich genau 1368 Watt pro Quadratmeter. Das ist der Strahlungsfluss, der auf der Mitte der sonnenzugewandten Seite des Globus senkrecht auf den Außenrand der Atmosphäre trifft. Für die gesamte Erdkugel, die ja immer zur Hälfte im Schatten liegt, stehen im Durchschnitt nur 25 Prozent dieses Werts zur Verfügung, also rund 342 Watt pro Quadratmeter.

Außerdem werfen Wolken und die Erdoberfläche die Sonnenstrahlung teilweise zurück. Dadurch verbleibt letztlich nur eine Nettoenergiezufuhr von etwa 240 Watt pro Quadratmeter. Im thermischen Gleichgewicht gibt die Erde denselben Energiebetrag in Form von Wärmestrahlung wieder ab. Während die irdische Lufthülle das einfallende kurzwellige Sonnenlicht weit gehend durchlässt, absorbieren atmosphärische Spurengase einen Teil dieser Wärmeabstrahlung und emittieren ihn wieder in alle Richtungen. Durch die nach un-

Die vorgeschlagenen Maßnahmen zum künstlichen Abkühlen der Erde – Climate Engineering – lassen sich grob in zwei Gruppen unterteilen. Die einen beeinflussen den Strahlungshaushalt der Erde: Strahlungsmanagement (Radiation Management – RM). Die anderen entziehen der Atmosphäre das Treibhausgas Kohlendioxid: Senkung der CO_2-Konzentration (Carbon Dioxide Removal – CDR). Die Grafik gibt einen Überblick über die wichtigsten Verfahren, die zur Debatte stehen.



Die Strahlungsbilanz der Erde



THE ROYAL SOCIETY, NACH: KIEHL, J. T., TRENBERTH, K. E., 1997

ten gerichtete Abstrahlung erhöht sich die Oberflächentemperatur der Erde, was man als Treibhauseffekt bezeichnet.

Mit Hilfe dieser drei Größen lässt sich in einem einfachen Zweischichtenmodell die mittlere Bodentemperatur der Erde von 15 Grad Celsius relativ gut reproduzieren. Ohne Absorption der langwelligen Wärmeabstrahlung durch atmosphärische Spurengase wie Kohlendioxid, Methan oder Lachgas läge der Wert nur bei etwa –18 Grad.

Wie der Mensch die Strahlungsbilanz beeinflusst

Seit Beginn der industriellen Revolution greift der Mensch massiv in diesen Strahlungshaushalt ein. Durch den Ausstoß von Treibhausgasen verringert sich die langwellige Wärmeabstrahlung. Dadurch verbleibt überschüssige Sonnenenergie an der Erdoberfläche und erwärmt sie. Die Differenz zwischen Ein- und Abstrahlung am oberen Atmosphärenrand, gemessen in Watt pro Quadratmeter, bezeichnen Klimaforscher als Strahlungsantrieb. Ist er positiv, erwärmt sich die Erde so lange, bis ein neues thermisches Gleichgewicht erreicht ist. Durch den Ausstoß von Treibhausgasen erhöht der Mensch den Strahlungsantrieb. Mit anderen Aktivitäten senkt er ihn allerdings auch. Beispiele sind die Umwandlung großer Waldgebiete in hellere Grün- oder Brachflächen und die Emission von Schwefeldioxid. Beides führt zu einer höheren Albedo und damit zu einer geringeren Zufuhr von Sonnenenergie.

Insgesamt überwiegen jedoch menschliche Aktivitäten, die den Strahlungsantrieb erhöhen. Den Nettoeinfluss schätzte der Weltklimarat IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) in seinem vierten Sachstandsbericht von 2007 auf 1,6 Watt pro Quadratmeter. Wie stark sich dadurch die Erde erwärmt, steht damit allerdings nicht genau fest. Das hängt nämlich auch von zahlreichen Rückkopplungen innerhalb des Klimasystems ab, die sich nicht exakt quantifizieren lassen. Deshalb bewegen sich die Schätzungen, wie stark bei einem Strahlungsantrieb von einem Watt pro Quadratmeter die globale Durchschnittstemperatur steigt – die so genannte Klimasensitivität –, zwischen 0,4 und 1,1 Grad Celsius.

Eventuelle Kipppunkte, an denen das Klimasystem in einen anderen Zustand übergeht, erschweren Prognosen der weiteren Erderwärmung zusätzlich. Beispiele wären die Verlagerung des Golfstroms, das Schmelzen der großen Eisschilde oder die massive Freisetzung von Methan aus tauenden Permafrostböden. In diesen Fällen können sehr kleine Änderungen im Strahlungsantrieb zu schnellen und lang anhaltenden Klimaänderungen führen, wie das in der Vergangenheit beim Wechsel zwischen Eis- und Warmzeiten der Fall war. Bisher gibt es allerdings keine Anzeichen, dass wir uns in der Nähe eines Kipppunkts befinden.

Wegen solcher Unsicherheiten lässt sich nur schwer abschätzen, wann der Klimawandel gefährliche Ausmaße erreicht. Weil der CO_2-induzierte Strahlungsantrieb sehr lange bestehen bleibt und das Klimasystem nur träge reagiert – mit einer Verzögerung von mehreren Jahrzehnten –, ist nicht auszuschließen, dass schon durch die bisherigen Kohlendi-

oxidemissionen für große Teile der Weltbevölkerung eine verhängnisvolle Entwicklung in Gang gesetzt worden ist.

Unter anderem aus diesem Grund denken besorgte Forscher und Politiker über Notfallmaßnahmen nach, die einen katastrophalen Klimawandel schnell mildern oder eindämmen könnten. Das bisher nur als theoretisches Konzept existierende Climate Engineering bietet sich möglicherweise dafür an. Ähnlich wie in der Medizin lässt sich dabei zwischen Maßnahmen unterscheiden, die wirklich die Ursachen oder nur die Symptome bekämpfen. Letztere zielen darauf ab, dem positiven Strahlungsantrieb durch Treibhausgase einen negativen entgegenzusetzen, um ihn so möglichst auszugleichen. Der Fachausdruck dafür ist Radiation Management (RM). Je nachdem ob die kurzwellige oder langwellige Strahlung beeinflusst wird, spricht man von Solar Radiation Management (SRM) oder Thermal Radiation Management (TRM). Im Gegensatz dazu laufen die ursächlich wirkenden Eingriffe darauf hinaus, Treibhausgase aus der Atmosphäre zu entfernen. Ganz überwiegend geht es dabei um Kohlendioxid, weshalb von Carbon Dioxide Removal (CDR) die Rede ist.

Die Sonneneinstrahlung lässt sich verringern

Es gibt bereits eine Vielzahl von Vorschlägen zur Klimabeeinflussung, und immer wieder kommen neue hinzu. Für kein Verfahren wurde aber die technische Machbarkeit, Effektivität oder Kontrollierbarkeit im Detail gezeigt. Deshalb ist die Diskussion darum, ob Climate Engineering überhaupt realistisch, nützlich und steuerbar sein kann, noch in vollem Gang. Dabei spielen auch politische und ethische Aspekte eine wichtige Rolle. Hier wollen wir uns jedoch nur mit der naturwissenschaftlichen Basis einiger viel diskutierter Methoden befassen.

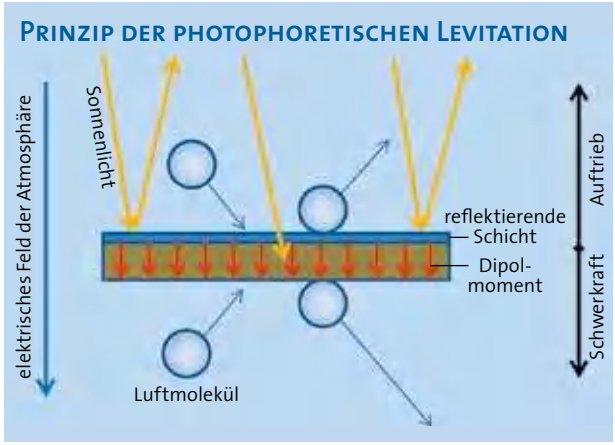
Ein früher Vorschlag lautete, eine Art Sonnenschirm im All zu installieren, um so die Solarkonstante zu verringern. Die Frage der praktischen Umsetzbarkeit und der Kosten ist jedoch weit gehend unbeantwortet. Der Aufwand wäre jedenfalls sehr hoch: Nach jetzigem Stand der Technik müssten Raketen, deren Startmasse zwei bis drei Größenordnungen über ihrer Nutzlast liegt, große Mengen an Material in den Weltraum befördern.

Aussichtsreicher erscheinen da schon Vorschläge, die Reflexion innerhalb der Erdatmosphäre zu erhöhen – beispielsweise durch Einbringen von Aerosolen. Dabei ließe sich mit relativ geringem Materialeinsatz die Sonneneinstrahlung deutlich drosseln. Da aus der Stratosphäre kein Niederschlag fällt, haben Aerosole dort eine relativ lange Verweildauer von ein bis zwei Jahren, während sie aus der Troposphäre in nur einer Woche ausgewaschen werden. Große Vulkanausbrüche haben den grundsätzlichen Wirkungsmechanismus bestätigt. Dabei gelangten teils erhebliche Mengen an Schwefeldioxid in die Stratosphäre und bildeten dort Sulfataerosole, die zu einer globalen Abkühlung um mehrere zehntel Grad in den folgenden Jahren führten.

Die Idee, den Klimawandel durch Schwefelinjektionen in die Stratosphäre zu begrenzen, hatte der russische Klimato-

Ein weltumspannender Sonnenschirm aus Nanopartikeln

Geeignet aufgebaute winzige Teilchen könnten von sich aus in die hohe Atmosphäre aufsteigen und dort Sonnenlicht reflektieren. Grundlage dafür ist die so genannte Photophorese, bei der Licht Kräfte auf Partikel ausübt, die von einem Gas umgeben sind. Wenn die Teilchen das Licht auf einer Seite stärker absorbieren als auf der anderen, erwärmen sie sich asymmetrisch. An der heißeren Seite werden dann aufprallende Gasmoleküle, weil sie mehr Wärmeenergie aufnehmen, heftiger zurückgeschleudert als an der kalten (Pfeile). Daraus resultiert eine Nettokraft in Richtung der kalten Seite. Dasselbe passiert auch, wenn die Teilchen auf einer Seite die Wärme effizienter an die Luft abgeben als auf der anderen. Bei Nanopartikeln kommt nur dieser Mechanismus in Betracht, weil sie zu klein sind, um einen Temperaturunterschied aufzubauen.



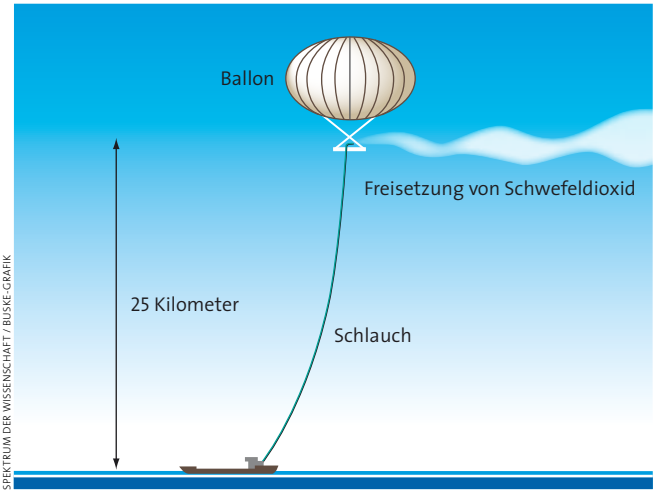
Um mit Hilfe photophoretischer Kräfte einen Auftrieb zu erzeugen, müssen die reflektierenden Teilchen alle die gleiche Orientierung zum Sonnenlicht haben. Dies lässt sich mit Elektretmaterialien erreichen, die ein elektrisches Dipolmoment aufweisen und sich deshalb im elektrischen Feld der Atmosphäre ausrichten. Ein solches Nanoteilchen bestünde also auf der einen Seite aus einer Schicht mit schlechtem Wärmeübergang zur Umgebung, die zugleich das Sonnenlicht reflektiert (beispielsweise Aluminium). Auf der anderen Seite enthielte es ein Material mit elektrischem Dipolmoment (etwa Bariumtitanat) und guter Wärmeabgabe. Dieses müsste von der reflektierenden Schicht weg zeigen. Indem es sich parallel zum elektrischen Feld der Erde orientiert, das zum Erdboden hinweist, würde es das Teilchen mit der reflektierenden Seite zur Sonne hin ausrichten. Da die Elektretschicht Wärme besser abgibt, würde das Partikel gleichzeitig zur Sonne hin beschleunigt.

loge Michail Budyko schon in den 1970er Jahren. Bekanntheit erlangte sie aber vor allem durch den niederländischen Meteorologen und Chemie-Nobelpreisträger Paul Crutzen. Dieser griff den Vorschlag in einem Artikel aus dem Jahr 2006 auf, stellte Berechnungen dazu an und ergänzte sie durch Beobachtungen bei der Eruption des Vulkans Pinatubo im Jahr 1991 sowie durch eine Analyse der industriellen Schwefelemissionen. Indem diese nach Umwandlung in Aerosolpartikel in der niedrigeren Troposphäre Sonneneinstrahlung reflektieren, so die Feststellung Crutzens, kompensieren sie schon heute einen Teil des anthropogenen Treibhauseffekts. Würde nur ein kleiner Teil davon in die höher liegende Stratosphäre verbracht, hätte dies einen noch stärkeren Kühleffekt. Zugleich gäbe es weniger unliebsame Nebenwirkungen wie sauren Regen oder Beeinträchtigungen der Gesundheit.

Nach heutigem Kenntnisstand ließe sich auf diese Weise in der Tat eine Verdopplung der vorindustriellen CO_2-Konzentration in der Atmosphäre ausgleichen. Doch der Aufwand wäre enorm – gälte es doch, einige Millionen Tonnen Schwefel pro Jahr in 15 bis 25 Kilometer Höhe zu verfrachten. An Ideen, wie das geschehen könnte, mangelt es nicht. Zur Debatte stehen unter anderem Luftschiffe, Raketen, Kanonen und lange, von Ballons getragene Schläuche. Am günstigsten wären aber wohl Flugzeuge, da bereits Typen existieren, die hoch genug fliegen können. Weil der Abkühlungseffekt nicht linear mit der Schwefelmenge steigt, müsste für eine stärkere Erniedrigung der Temperatur überproportional immer mehr Schwefel in die Stratosphäre gebracht werden.

Armada von Nanopartikeln in der Stratosphäre

Als Alternative hat der US-Physiker David Keith kürzlich maßgeschneiderte Nanopartikel ins Spiel gebracht. Diese wären so aufgebaut, dass sie bei Sonneneinstrahlung einen Auftrieb erfahren und dadurch selbstständig bis in die obere Stratosphäre oder gar in die Mesopause (in 80 Kilometer Höhe) aufsteigen (siehe Kasten auf S. 7). Dort würden sie sich als Miniaturspiegel im elektrischen Feld der Erde ausrichten. Ihre Verweildauer wäre nur durch den (foto)chemischen Abbau begrenzt und damit potenziell sehr hoch.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK

Das Konzept scheint gleich mehrere Vorteile zu vereinen. Außer dass der Aufwand für die Beförderung in hohe Luftschichten entfällt, wäre dank der langen Verweilzeit und optimierbarer optischer Eigenschaften der Materialeinsatz viel geringer. Auch würde die Ozonschicht wohl weniger beeinträchtigt, und es käme nicht im selben Maß zu einer diffusen Lichtstreuung, die den Himmel milchig trüb erscheinen ließe, wie beim Einsatz von Sulfataerosolen.

Noch handelt es sich allerdings um reine Gedankenspiele, da Partikel mit den benötigten Eigenschaften bisher nicht existieren und beim gegenwärtigen Stand der Technik wohl auch nicht in den erforderlichen Mengen herstellbar wären. Außerdem ist unklar, wie sich erreichen ließe, dass sie den extremen Bedingungen in der oberen Atmosphäre lange genug standhalten. Zugleich erhebt sich die Frage nach der Umweltverträglichkeit der für den Aufstieg benötigten speziellen Materialien.

Es gibt auch eine Möglichkeit, die Strahlungsbilanz der Erde in tieferen Schichten der Atmosphäre zu beeinflussen: durch Manipulation der Bewölkung. Hohe, helle Zirruswolken, die aus Eiskristallen bestehen, reflektieren sowohl kurzwelliges Sonnenlicht als auch langwellige Wärmestrahlung. Da der letztgenannte Effekt jedoch in der Regel überwiegt, erhöhen sie insgesamt die Temperatur. Gelänge es also, sie künstlich aufzulösen, könnte die langwellige Wärmestrahlung vom Erdboden besser ins All entweichen – mit kühlender Wirkung. Tief hängende, aus Wassertröpfchen aufgebaute Stratokumuluswolken streuen dagegen vor allem kurzwelliges Sonnenlicht in den Weltraum zurück. Ihre Bildung zu fördern oder dafür zu sorgen, dass sie länger bestehen bleiben oder heller sind, brächte deshalb gleichfalls eine gewisse Abkühlung.

Das Ausmaß der Kühlwirkung ist bei der Manipulation von Wolken allerdings deutlich unsicherer als beim Verfrachten von Aerosolen in die Stratosphäre. Denn in diesem Fall verändern die eingebrachten Materialien den Strahlenfluss nicht direkt, sondern nur auf dem Umweg über die Wolken. Deren grundsätzliches Verständnis lässt aber noch einiges zu wünschen übrig (siehe Spektrum der Wissenschaft 7/2011, S. 80).

Bei den hohen Zirren wäre denkbar, sie mit Kristallisationskeimen für die Eisbildung zu versetzen. Dadurch entstünden weniger, dafür aber größere Eispartikel, die schneller herabfallen. So würden sich die Wolken schneller auflösen und einen geringeren Teil des Himmels bedecken. David L. Mitchell und William Finnegan vom Desert Research Institute in Reno (Nevada) schlagen Wismutjodid als Keime vor. Man könnte es dem Treibstoff von Linienflugzeugen beimi-

Mit Schwefeldioxid in der Stratosphäre ließe sich die auf die Erde treffende Sonnenenergie reduzieren. Das Gas könnte durch Schläuche in große Höhen geleitet werden, wo es mit Wasserdampf und Sauerstoff Sulfataerosole bildet. Diese reflektieren das Sonnenlicht und kühlen so die Erde.

JOHN MACNEILL ILLUSTRATION

Auch durch Versprühen von Meerwasser ließe sich die Erde abkühlen. Auf diese Weise würde die Bildung tiefer, heller Wolken angeregt, die Sonnenlicht reflektieren.

schen oder in ihre Abgase einspritzen. Da die Substanz die Eisbildung nur bei Temperaturen unter –20 Grad Celsius stark fördert, hätte sie kaum Auswirkungen auf niedrigere Wolken. Experimentell ist die Methode noch nicht erprobt.

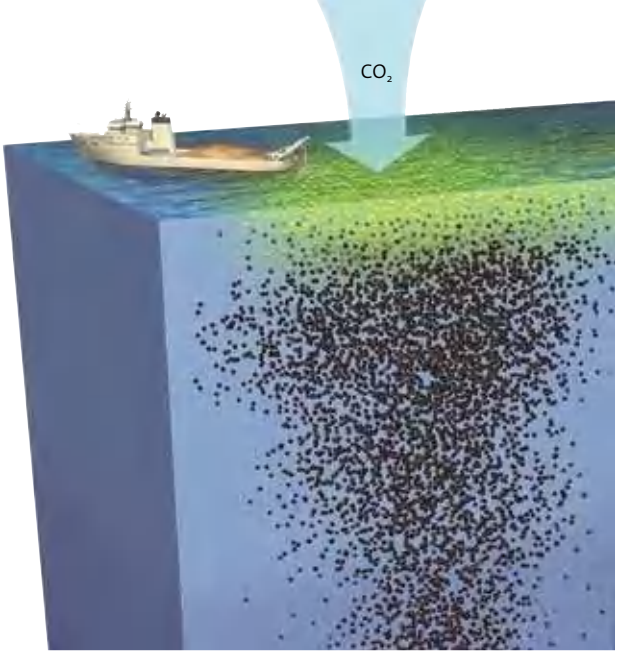
Tief liegende Stratokumuluswolken lassen sich durch Aerosole beeinflussen, da diese als Kondensationskeime wirken. Steigt ihre Konzentration, bilden sich mehr, aber kleinere Wassertröpfchen. So entstehen ausgedehnte, helle Wolken. Der Effekt wäre dort besonders stark, wo die Luft – wie über einigen Meeresgebieten – normalerweise nur wenig Aerosole enthält. Das belegen Satellitenbilder, auf denen von Rauchpartikeln erzeugte Wolken die Routen von Schiffen markieren. Nach einem Vorschlag des Physikers John Latham von der University of Manchester (Großbritannien) ließe sich durch Versprühen feiner Meerwassertröpfchen dieser Effekt gezielt verstärken. Allerdings ist noch ziemlich unklar, wie das in der Praxis geschehen könnte und ob es überhaupt technisch machbar wäre.

Schließlich besteht auch die Möglichkeit, die Rückstrahlung direkt an der Erdoberfläche zu erhöhen. Durch die angesprochenen Landnutzungsänderungen ist das bereits unabsichtlich geschehen. Als gezielte Maßnahme wäre eine Erhöhung der Albedo von Städten, Grünflächen oder Wüsten denkbar. Das »Weißeln« von Hausdächern oder Straßen bringt wegen der geringen Flächen global aber nur wenig, sondern kann lediglich das lokale Klima beeinflussen und Energiekosten sparen. Auch gibt es nicht genug Grün- oder Waldflächen, als dass sich durch ihre »Aufhellung« die globale Albedo erhöhen ließe. Nur das Bepflastern von Wüsten mit stark reflektierendem Material könnte den irdischen Strahlungshaushalt merklich beeinflussen, wäre aber viel teurer als die Reduktion der Kohlendioxidemissionen.

Aussichtsreicher erscheint es da, die Albedo der Ozeane zu verändern. Interessanterweise war das der erste dokumentierte Vorschlag zur Beeinflussung des Klimas: Wissenschaftliche Berater von US-Präsident Lyndon B. Johnson machten ihn schon 1965. Wegen der technischen Schwierigkeiten und der zu erwartenden negativen Auswirkungen auf die Umwelt wurde die Idee aber kaum weiterverfolgt. Erst kürzlich brachte sie Russell Seitz von der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) wieder ins Gespräch. Seine Lösung: mikroskopische Luftblasen im Meerwasser. Sie ließen sich relativ leicht von Schiffen aus erzeugen und hätten eine Lebensdauer von Monaten bis Jahren. Brechende Wellen produzieren solche Mikrobläschen auf natürliche Weise, allerdings nur in verschwindender Konzentration. Wegen der riesigen Fläche der Ozeane könnte diese Maßnahme für einen starken negativen Strahlungsantrieb sorgen. Die Idee ist sehr spekulativ, zeigt aber, dass immer wieder neue Vorschläge auftauchen.

Befürworter des Climate Engineering preisen solche Radiation-Management-Maßnahmen geradezu als Wunderwaffen. Einige könnten den Planeten schon innerhalb weniger Monate deutlich abkühlen – und das angeblich bei moderaten Kosten, die für einzelne Staaten oder sogar für privat finanzierte Konsortien erschwinglich wären. Doch enthalten solche Rechnungen nur das, was für die Einrichtung und den Betrieb aufzuwenden wäre. Tatsächlich verursachen RM-Eingriffe jedoch langfristige gesamtwirtschaftliche Folgekosten auf Grund von Nebenwirkungen und der Notwendigkeit, sie sehr lange aufrechtzuerhalten (siehe das Interview auf S. 12).

Auch würde nicht etwa das frühere Klima wiederhergestellt, sondern ein neues, künstliches Klima geschaffen. Während nämlich die gestiegene Treibhausgaskonzentration den Wasserkreislauf im Wesentlichen über die Troposphäre beeinflusst, verändert ihn das Radiation Management primär über das Strahlungsbudget an der Erdoberfläche. Dadurch ergäbe sich eine neue Niederschlagsverteilung, die nicht unbedingt mit der vorindustriellen übereinstimmen würde. Ähnliches gilt für die Eisbedeckung. Soll sie auf der Nordhalbkugel wieder das einstige Niveau erreichen, würden wahrscheinlich auch auf der Südhalbkugel bislang gletscherfreie Regionen vereisen. Die Vor- und Nachteile des Radiation Management verteilen sich also ungleichmäßig auf die verschiedenen Regionen, was zu erheblichen politischen Spannungen und finanziellen Kompensationsforderungen führen kann. Außerdem helfen solche Maßnahmen nur gegen den Temperaturanstieg, nicht aber gegen die anderen Auswirkungen einer erhöhten CO_2-Konzentration wie die Versauerung der Meere.



SW INFOGRAPHICS, SAMUEL UND PEDRO VELASCO

Eine Möglichkeit, der Atmosphäre Kohlendioxid zu entziehen, wäre die Düngung von Meeresregionen mit Eisen. Der Pflanzennährstoff würde das Wachstum von Algen fördern, die ihrerseits CO_2 aus der Luft aufnehmen und es, wenn sie nach dem Absterben absinken, langfristig in Meeressedimenten binden.

CDR-Maßnahmen, die beim Kohlendioxid selbst ansetzen, sind mit keinen solchen Risiken und Nebenwirkungen verbunden. Außerdem beeinflussen sie den Strahlungshaushalt nachhaltig und müssen nicht wie das Radiation Management so lange durchgeführt werden, bis sich die Treibhausgaskonzentration auf natürlichem Weg reduziert hat. Dafür wirken sie langsamer und erscheinen zunächst kostspieliger. Trotzdem können sie bei einer langfristigen, dynamischen Betrachtung durchaus besser abschneiden als RM-Verfahren.

Für CDR-Eingriffe bieten sich physikalische, chemische und biologische Prozesse an. Als physikalische Methode wurde vorgeschlagen, die Ventilation der Ozeane zu beschleunigen, so dass diese in kürzerer Zeit mehr CO_2 aufnehmen. Allerdings scheint das energetisch wenig sinnvoll und würde die Wärmekapazität der Weltmeere nachhaltig stören.

Der Luft CO_2 entziehen

Die biologischen Methoden basieren auf der Fotosynthese, mit deren Hilfe Pflanzen Kohlendioxid aus der Luft aufnehmen und daraus organische Verbindungen herstellen. Dazu zählen Aufforstung und Landnutzungsänderungen, die in begrenztem Umfang schon Teil des Kioto-Protokolls sind. Der gebundene Kohlenstoff kann aber auch in so genannte Biokohle umgewandelt und in Böden eingebracht werden. Dort bliebe er für Jahrtausende konserviert und würde womöglich sogar die Bodenqualität verbessern.

Prinzipiell sind biologische CDR-Methoden an Land aber durch die Flächenkonkurrenz mit der Nahrungsmittelproduktion begrenzt, und eine Ausweitung auf andere Areale wäre mit enormen Kosten verbunden. So käme bei einer künstlichen Bepflanzung von Sahararegionen allein die Bewässerung teurer als konventionelle Maßnahmen zur Verringerung der CO_2-Emissionen.

Denkbar wäre auch, die ozeanische CO_2-Aufnahme durch Anregung des Algenwachstums zu erhöhen. Zwar enthalten die Meere nur einen kleinen Teil der Biomasse unseres Planeten, aber das marine Phytoplankton kommt für etwa die Hälfte der globalen Fotosynthese auf. Die Verteilung der dazu nötigen Nähr- und Spurenstoffe im Oberflächenwasser hängt von verschiedenen Faktoren ab und ist deshalb sehr ungleichmäßig. Infolgedessen gibt es große Meeresregionen, in denen der Mangel eines oder mehrerer Nähr- oder Spurenstoffe wie Nitrat oder Eisen das Algenwachstum begrenzt. Hier setzen biologische Verfahren zur Kohlenstoffeinlagerung in den Ozean an: Durch Düngung soll das Algenwachstum angeregt werden, so dass die Meere mehr CO_2 aufnehmen.

In großen Teilen des Nord- und äquatorialen Pazifiks sowie des Südlichen Ozeans herrscht Eisenmangel, während andere Nährstoffe wie Nitrat und Phosphat ausreichend vorhanden sind. Deshalb formulierte der Ozeanograf John Martin (1935–1993) schon vor mehr als 20 Jahren provokant: »Gebt mir einen halben Tanker Eisen, und ich gebe euch die nächste Eiszeit.« Freilandexperimente bestätigten zwar den grundsätzlichen Wirkungsmechanismus, aber nicht das von Martin behauptete Potenzial.

Im Südlichen Ozean gibt es in der Nähe von Inseln auch natürliche Eisendüngung durch eisenhaltiges Gestein. Tatsächlich wird dort mehr Kohlenstoff durch Algen gebunden und in die Tiefe befördert als im nicht gedüngten Umgebungswasser. Extrapoliert man diese Ergebnisse in Modellen auf den gesamten Südlichen Ozean, könnte dieser jährlich maximal fünf Gigatonnen Kohlendioxid zusätzlich aufnehmen, was etwa 15 Prozent der momentanen anthropogenen CO_2-Emissionen entspräche. Da sich die Düngung auf das gesamte marine Ökosystem auswirken dürfte, ist allerdings noch unsicher, wie sie die Nahrungskette des Meeres und seine Produktivität beeinflusst. Außerdem entsteht bei der mikrobiellen Zersetzung des zusätzlich organisch gebundenen Kohlendioxids als Nebenprodukt Lachgas, das etwa zehn Prozent des Düngungseffekts wieder aufhebt.

Grundsätzlich birgt die künstliche Verstärkung der Fotosynthese ein relativ hohes Risiko unerwünschter Nebeneffekte, weil biologische Kreisläufe in aller Regel ziemlich empfindlich auf Eingriffe reagieren und besonders in ökologischer Hinsicht oft erst ansatzweise verstanden sind. Chemische CDR-Methoden sind in dieser Hinsicht leichter überschaubar. Sie zielen darauf ab, die natürliche Verwitterung zu beschleunigen, bei der Gesteine mit Kohlendioxid aus der Luft reagieren. Im einfachsten Fall kann man Kalk- oder Silikatgestein zermahlen und den Staub an Land – vorzugsweise in feuchtwarmen tropischen Gebieten – oder über dem Meer ausstreuen. Theoretisch haben solche Maßnahmen ein recht hohes Potenzial, und die zu Grunde liegenden chemischen Reaktionen sind gut bekannt. Außerdem würde der Ozeanversauerung entgegengewirkt. Die praktische Hürde liegt bei den logistischen Anforderungen und den Kosten. Für einen nennenswerten Effekt wäre sehr viel Gestein abzubauen und

zu zerkleinern. Der Lufthülle ähnlich große Mengen an CO_2 zu entziehen wie bei der Eisendüngung, würde bergbautechnische Aktivitäten in einem Umfang wie bei der Gewinnung fossiler Brennstoffe erfordern.

Ein weiterer Vorschlag ist das maschinelle Filtern von CO_2 aus der Atmosphäre. Dazu leitet man Luft über einen Stoff, der selektiv Kohlendioxid adsorbiert. Bei seiner anschließenden Regeneration wird reines CO_2 frei, das sich etwa an Gewächshäuser oder die Industrie verkaufen ließe. Diese Anlagen funktionieren für das Sorptionsmittel als geschlossene Kreislaufsysteme, benötigen zum Substanztransport und zur Regeneration aber Energie. Wird dieser Energiebedarf aus fossilen Brennstoffen gedeckt, könnte das Verfahren sogar mehr Kohlendioxid produzieren, als es der Atmosphäre entzieht. Sinnvoll erscheint sein Einsatz daher nur bei Verwendung CO_2-neutraler Energiequellen, die sonst nicht nutzbar wären. Generell ist das Abtrennen von Kohlendioxid aus der Luft derzeit noch keine kostengünstige Alternative zur herkömmlichen Emissionskontrolle.

Lösung für das »grüne Paradoxon«

Bis zu einem gewissen Grad gilt das für alle diskutierten CDR-Maßnahmen: Sie bieten, was ihr Potenzial und ihre Kosten angeht, meist kaum Vorteile gegenüber Bemühungen, den Ausstoß von CO_2 zu verringern. Allerdings vermeiden sie bei einseitiger Emissionskontrolle durch nur wenige Länder einen negativen Effekt, den der deutsche Ökonom Hans-Werner Sinn als das »grüne Paradoxon« bezeichnet hat. Wenn nämlich einzelne Staaten auf eigene Faust ihren Verbrauch an fossilen Brennstoffen drosseln, lässt die dadurch verringerte Nachfrage deren Weltmarktpreis sinken. Dadurch können andere Länder, die sich nicht an der Emissionskontrolle beteiligen, ihren Verbrauch ausweiten, so dass die CO_2-Emissionen insgesamt gleich bleiben. Bei CDR-Maßnahmen tritt dieser Effekt nicht auf, weil sie keinen Einfluss auf die Nachfrage nach fossilen Brennstoffen haben.

Wie diese Überlegungen zeigen, eröffnet das Climate Engineering zwar neue Möglichkeiten für die Klimapolitik, könnte aber die Anstrengungen für eine weltweite Emissionskontrolle torpedieren. Bei CDR-Maßnahmen ist diese Gefahr geringer. Selbst wenn sie die Bemühungen um eine Verringerung des CO_2-Ausstoßes beeinträchtigen, reduzieren sie dennoch im Endeffekt die Menge des Treibhausgases in der Atmosphäre. Anders verhält es sich bei RM-Eingriffen. Sie machen einen weiteren Anstieg der atmosphärischen CO_2-Konzentration und damit eine Verschärfung der ursächlichen Problematik wahrscheinlich. Eigentlich sollten sie einen Ausweg aus den bisher wenig erfolgreichen Bemühungen um eine international verbindliche Vereinbarung zur wirksamen Emissionskontrolle bieten. Stattdessen ergibt sich aus ihnen ein neues Dilemma für den Klimaschutz. Drohen irgendwann Kipppunkte im Klimasystem überschritten zu werden, gibt es für eine schnelle Abkühlung praktisch keine Alternative zu RM-Eingriffen in die Strahlungsbilanz. Sind aber funktionierende RM-Technologien für die Zukunft zu erwarten, weil wir sie heute erforschen, sinkt der Anreiz, durch entschiedene Emissionskontrolle dafür zu sorgen, dass wir sie nicht nutzen müssen.

Dieses Dilemma zeigt, wie schwierig es ist, die Erforschung des Climate Engineering in den Maßnahmenkatalog zum Klimaschutz aufzunehmen. Die Berücksichtigung von RM-Technologien bringt uns womöglich auf einen ganz anderen Emissionspfad – mit gravierenden, unkalkulierbaren Folgen. Auf der anderen Seite sind die Unsicherheiten über den Klimawandel immer noch so groß, dass es genauso riskant wäre, diese Technologien nicht zu erforschen. Spinnt man derartige Überlegungen weiter und bezieht auch die soziale, politische, rechtliche und ethische Dimension mit ein, wird schnell deutlich, dass sich die Bewertung des Climate Engineering nicht auf die naturwissenschaftliche Machbarkeit beschränken darf, sondern eine umfassende Betrachtung der Auswirkungen auf unsere Gesellschaft erfordert. Es geht nicht allein darum, was wir tun können, sondern auch, was wir tun wollen. Fest steht nur, dass wir nicht nichts tun können. ~

DIE AUTOREN

Thomas Leisner (links) ist Direktor am Institut für Meteorologie und Klimaforschung des Karlsruher Instituts für Technologie sowie Professor für Atmosphärenphysik an der Universität Heidelberg. Seine Forschungsschwerpunkte sind atmosphärische Aerosole, Wolken und Niederschlag. **Andreas Oschlies** (Mitte) ist Professor für Biogeochemische Modellierung an der Universität Kiel und am Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel (GEOMAR). Er beschäftigt sich hauptsächlich mit den physikalischen, biogeochemischen und ökologischen Grenzen der ozeanischen CO_2-Aufnahme, mit der Klimasensitivität physikalischer, chemischer und biologischer Prozesse im Meer sowie mit deren Abbildung in biogeochemischen Modellen. **Wilfried Rickels** ist Postdoc am Institut für Weltwirtschaft in Kiel im Forschungsbereich »Umwelt und natürliche Ressourcen« und befasst sich vor allem mit den Möglichkeiten und Grenzen der ozeanischen CO_2-Aufnahme in dynamischen Optimierungsmodellen.

QUELLEN

Feichter, J., Leisner, T.: Climate Engineering: A Critical Review of Approaches to Modify the Global Energy Balance. In: The European Physical Journal Special Topics 176, S. 81–92, 2009

Keith, D.W.: Photophoretic Levitation of Engineered Aerosols for Geoengineering. In: Proceedings of the National Academy of Sciences 107, S. 16 428–16 431, 2010

Lackner, K.S.: Große Wäsche für das Klima. In: Spektrum der Wissenschaft 1/2011, S. 70–75, 2010

Rickels, W. et al.: Gezielte Eingriffe in das Klima? Eine Bestandsaufnahme der Debatte zu Climate Engineering. Sondierungsstudie für das Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2011

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1142732**

»Der Himmel wäre nie mehr blau«

Im Gespräch mit »Spektrum der Wissenschaft« bewertet der Umweltethiker **Konrad Ott** die Maßnahmen des Climate Engineering aus moralphilosophischer Sicht.

Spektrum der Wissenschaft: *Warum ist Climate Engineering für einen Philosophen und Ethiker ein Thema?*
Konrad Ott: Schon allein deshalb, weil es zum Problem des Klimawandels gehört. Und der steckt voller ethischer Fragestellungen. Man könnte sogar sagen, dass er im Kern ein umweltethisches Problem ist und kein rein wissenschaftliches oder technisches. Bei seiner Lösung aber bewegt man sich in dem Spannungsfeld zwischen Reduktion von Treibhausgasen, Anpassungsmaßnahmen und den verschiedenen Möglichkeiten des Climate Engineering.

Was sind die ethischen Probleme speziell bei Letzteren?
Ott: Betrachten wir einmal den Vorschlag, mehrere Millionen Tonnen Sulfataerosole in die Stratosphäre einzubringen, um so die Sonneneinstrahlung zu verringern. Laut den Befürwortern einer solchen Maßnahme handelt es sich um einen vorübergehenden kurzfristigen Eingriff. Aber wenn er in Erwägung gezogen wird, sagen viele Verantwortliche in Wirtschaft und Politik vermutlich: »Warum noch Emissionen reduzieren, es gibt ja jetzt eine technische Lösung.« Und dann müsste die Menschheit vielleicht sehr lange mit dieser Art Schutzschild in der Stratosphäre leben, um den fortgesetzten Ausstoß von Kohlendioxid auszugleichen.

Sie meinen also, die Sulfatoption könnte die Bemühungen um eine Verringerung der Emissionen untergraben.
Ott: Diese Einschätzung beruht zwar auf einer Reihe von Voraussetzungen. Aber vieles spricht dafür.

Angenommen, Sie haben Recht, und die Menschheit setzt weiter massenhaft CO_2 frei. Wenn der Sulfatschutzschild funktioniert, wäre daran doch nichts auszusetzen.
Ott: Bei Eingriffen dieser Größenordung sollte man immer auch den schlimmsten Fall bedenken. So könnte es sein, dass plötzlich schwer wiegende Nebenwirkungen auftreten, also etwa der saure Regen wiederkehrt, die Meere versauern oder die Niederschläge zurückgehen. Dann müssten wir unter Umständen zwischen zwei Übeln wählen: die Injektionen trotzdem fortzusetzen oder damit aufzuhören und einen drastischen Klimawandel innerhalb weniger Jahrzehnte in Kauf zu nehmen; denn der CO_2-Gehalt der Atmosphäre wäre inzwischen ja erheblich angestiegen, was ohne Gegenmaßnahmen eine starke Erwärmung zur Folge hätte. Solange wir noch andere Handlungsoptionen haben, sollten wir auf jeden Fall einen Weg vermeiden, der zukünftige Generationen in eine derart fatale Situation bringen könnte.

Sehen Sie noch andere ethische Probleme mit der Sulfatinjektion in die Stratosphäre?
Ott: Die gibt es ohne Zweifel. Wenn man das tatsächlich macht, wird sich zum Beispiel die Farbe des Himmels verändern. Er wird nie mehr blau sein, sondern milchig oder gräulich, ähnlich wie Hochnebel. Und wir werden auch die Sterne in der Nacht nie mehr sehen können.

Ist das nicht eher ein ästhetisches Problem?
Ott: Finden Sie? Dieses Argument ist deshalb so interessant, weil man sich hier wirklich fragen muss, was uns das Himmelsblau eigentlich bedeutet. Ist das nur Ästhetik, oder reicht das in die Lebenswelt des Menschen hinein?

Die Lebenswelt verändert sich nun einmal – das war immer so. Denken Sie nicht, wir werden uns daran gewöhnen?
Ott: Die Frage ist: Sollen wir uns daran gewöhnen wollen? Sollten wir nur, weil wir nicht bereit sind, einen bestimmten, energieintensiven Lebensstil aufzugeben, dafür den blauen Himmel und den Blick auf die Sterne opfern? Ich würde es da mit Albert Schweitzer halten, dem zufolge Ethik auch etwas damit zu tun hat, nicht abzustumpfen. Statt zu sagen: »Irgendwie kommen wir schon über die Runden, das Leben geht weiter«, sollten wir das, was momentan mit dem Climate Engineering auf dem Spiel steht, in seiner moralischen Brisanz und Tragweite voll erfassen.

Und wenn alle Völker in einem globalen Konsens die Sulfatinjektion gutheißen würden?
Ott: Gerade die entschiedensten Befürworter dieser Option sagen ja, ein Konsens sei nicht unbedingt erforderlich. Rein technisch könnte die Sulfatoption von einigen wenigen Staaten, von einer Art Koalition der Willigen, durchgeführt werden. Anderen Risiken aufzubürden, ist für mich als Diskursethiker aber nur statthaft, wenn die Betroffenen die Gelegenheit zu informierter Zustimmung haben. Diese Konsensidee ist eine entscheidende Legitimationsbedingung, die mir freilich nur schwer erfüllbar scheint.

ZUR PERSON

Konrad Ott ist Professor für Umweltethik an der Universität Greifswald. Er hat in Frankfurt am Main Philosophie studiert und bei Jürgen Habermas promoviert. Von 2000 bis 2008 gehörte er dem Sachverständigenrat für Umweltfragen der deutschen Bundesregierung an. Als Diskursethiker geht er davon aus, dass sich die Richtigkeit von Handlungsanweisungen durch rationale Argumentation ermitteln lässt, wobei deren Regeln durch die Teilnahme am Diskurs anerkannt werden.

Wie könnte solch ein informierter Konsens aussehen, und wer könnte darüber befinden?

Ott: Letztlich nur die Völkergemeinschaft selbst. Wenn sich die Vereinten Nationen nach einem langen Diskussionsprozess damit einverstanden erklären würden, müsste ich als Ethiker anerkennen, dass zumindest diese Legitimitätsbedingung erfüllt ist. Moralische Bedenken wie die oben genannten blieben davon jedoch unberührt.

Sind andere Methoden des Climate Engineering vielleicht weniger problematisch?

Ott: Beim Climate Engineering unterscheidet man grob zwischen zwei Ansätzen: der Manipulation der Sonneneinstrahlung – darunter fällt die besprochene Sulfatoption – und der Kohlenstoffsequestrierung, also dem Anlegen von CO_2-Senken. Das kann etwa durch Aufforsten oder durch Vernässen von Mooren geschehen. Wenn die Sequestrierung mit einer Verringerung der Emissionen kombiniert würde, kämen wir beim Klimawandel vielleicht mit einem blauen Auge davon.

Würde die Sequestrierung die Reduktionsbemühungen nicht genauso unterminieren wie der Aerosolansatz?

Ott: Nein, weil sie einen anderen Pfad ergibt. Wenn wir die Emissionen stark verringern, uns klug anpassen und darüber hinaus temporäre CO_2-Senken anlegen, dann ist das ein ganz bestimmter Pfad, der den Klimawandel in einem tolerierbaren Bereich halten könnte. Zudem bestehen bei CO_2-Senken kaum Risiken. Da kann man im Grunde nur sehr wenig falsch machen, und die Maßnahmen sind reversibel.

Es gibt dazu aber auch ganz andere Meinungen. Was, wenn die CO_2-Lager den Boden zerstören oder undicht werden?

Ott: Ich habe nicht von Lagern gesprochen, also nicht von CCS, dem Verpressen von CO_2 tief im Erdboden. Vielmehr meine ich natürliche Kohlenstoffsenken. CCS wäre noch einmal gesondert sehr gründlich zu bewerten. Darauf möchte ich hier aber nicht näher eingehen.

Warum nicht?

Ott: Weil man beim Abwägen der verschiedenen Climate-Engineering-Optionen am Ende immer bei der Aerosolinjektion landet; denn sie wirkt relativ schnell und verursacht vergleichsweise wenig direkte Kosten. Außerdem kann sie von einem oder einigen wenigen Staaten im Alleingang durchgeführt werden. Deswegen beschäftige ich mich vor allem damit, ob diese Option ethisch legitim sein kann.

Was ist mit der Idee, die Sonneneinstrahlung im Weltall mit Schutzschirmen abzufangen – wäre das nicht die perfekte großtechnische Lösung, ohne Nebenwirkungen?

Ott: Ich finde es einigermaßen kurios, wenn gerade von den Kreisen, die uns immer vorrechnen, wie teuer die Verringerung der Emissionen ist, plötzlich Vorschläge kommen, deren Kosten im Bereich von Billionen US-Dollar liegen. Schon grobe Überschlagsrechnungen zeigen, dass die Vermeidung von Emissionen sehr viel preiswerter ist.

Ist das Argument nicht eher ökonomisch als ethisch?

Ott: Ökonomische Entscheidungen sind ethisch nie neutral. Ob ich mein Geld für Solaranlagen ausgebe oder für Sonnenschirme im All, hängt nicht nur von wirtschaftlichen Überlegungen ab, sondern ist auch eine Sache meiner persönlichen Wertvorstellungen. Investitionsentscheidungen verändern die Zukunft und die Welt, die andere vorfinden.

Und wenn ein paar superreiche Wohltäter der Menschheit diese Schirme im All spendieren?

Ott: Anders formuliert, fragen Sie: Wenn es die perfekte technische Lösung ohne Nebenwirkungen gäbe, sollte man sie dann realisieren? Aber das ist eben Sciencefiction, diese Patentlösung existiert nicht. So ein Gedankenexperiment bringt uns auch ethisch nicht weiter. Die Suche nach der technischen Patentlösung ist nur dazu geeignet, uns den Blick zu verengen und zu verstellen.

Dann kommen wir zurück zur Realität. Ist es für Ihre ethische Einschätzung auch von Belang, wer die großtechnischen Climate-Engineering-Maßnahmen propagiert?

Ott: Es fällt ja auf, dass genau die Nationen, die in der Vergangenheit Klimaverhandlungen sabotiert haben, diese Optionen jetzt in die Diskussion bringen. Ich überlege tatsächlich, ob es ein Argument dafür geben kann, solchen Ländern die moralische Berechtigung abzusprechen, derartige Vorschläge zu machen.

Was ist das Ergebnis Ihrer Überlegungen?

Ott: Der Gedanke, dass jemand durch sein Verhalten in der Vergangenheit das Recht verwirkt hat, ein bestimmtes Argument vorzubringen, ist für mich als Diskursethiker sehr ungewöhnlich. Man könnte vielleicht Begriffe wie Glaubwürdigkeit oder Aufrichtigkeit heranziehen, um zu begründen, warum jemand die moralische Legitimation verliert, eine Option zu vertreten, wenn er zuvor alle anderen Lösungswege blockiert hat. Aber das ist ein sehr harter Vorwurf, da muss man sich seiner Gründe sehr sicher sein. Ich hege noch Bedenken, ob ein solches Vorgehen zulässig ist. Prinzipiell aber halte ich es durchaus für vorstellbar, so zu argumentieren. ~

Die Fragen stellte **Miriam Ruhenstroth**, freie Wissenschaftsjournalistin in Berlin.

Klimawandel und Küstenschutz

Eine der größten Bedrohungen durch die Erderwärmung stellt der Anstieg des Meeresspiegels dar. Besonders gefährlich ist er für tief gelegene Flussdeltaregionen wie in Bangladesch und Vietnam sowie für Inselstaaten in der Südsee und der Karibik. Auch auf Deutschland kommen beträchtliche Herausforderungen zu.

Von Horst Sterr

Seit Beginn der Industrialisierung übt der Mensch einen stetig wachsenden Einfluss auf das irdische Klimasystem aus, indem er Gase freisetzt, welche die Rückstrahlung der Wärme vom Erdboden in den Weltraum verhindern. Diese Treibhausgase, namentlich Wasserdampf, Kohlendioxid, Methan, Stickoxide und Ozon, kommen zwar schon immer in gewissen Mengen in der Erdatmosphäre vor. Durch die vom Menschen betriebene Land- und Energienutzung nimmt ihre Konzentration jedoch beständig zu. Dadurch ist die globale Durchschnittstemperatur seit 1900 schon um knapp ein Grad Celsius angestiegen. Da eine Beschränkung oder gar Reduktion des Ausstoßes an Treibhausgasen leider nicht in Sicht ist, wie jüngst die Klimakonferenz in Durban zeigte, wird sich die Erde weiter erwärmen – um schätzungsweise zwei bis fünf Grad Celsius bis zum Jahr 2100.

Wie ein Blick zurück in die Erdgeschichte lehrt, wirkt sich das auch auf den Meeresspiegel aus. So schwankte dieser in den letzten zwei bis drei Millionen Jahren als Folge des mehrfachen Wechsels zwischen Kalt- und Warmzeiten um bis zu 130 Meter. Noch vor 20 000 Jahren lag fast das gesamte Nordseebecken trocken. Mit dem Ende der letzten Eiszeit vor 12 000 bis 6000 Jahren stieg der Spiegel der Weltmeere um rund 120 Meter an. Danach blieb er weit gehend stabil; durch die heutige Erderwärmung droht er sich jedoch weiter zu erhöhen. Im 20. Jahrhundert betrug der Anstieg – nach einem langsamen Beginn und einer deutlichen Beschleunigung zum Ende hin – im globalen Durchschnitt bereits 17 Zentimeter. Hochpräzise Messungen per Satellit ergaben inzwischen, dass er sich seit 1990 etwa verdoppelt hat und jetzt 3,3 Zentimeter im Jahrzehnt ausmacht. Angesichts der zu erwartenden weiteren Erwärmung rechnen einige Wissenschaftler mit einer Erhöhung des Meeresspiegels um bis zu zwei Meter bis zum Jahr 2100 (Grafik auf S. 16).

Das liegt unter anderem an der Ausdehnung des Meerwassers, das sich bis in rund 500 Meter Tiefe erwärmt. Dieser Effekt war für etwas mehr als die Hälfte des Meeresspiegelanstiegs im 20. Jahrhundert verantwortlich. Weitere 30 bis 35 Prozent resultierten aus dem Abschmelzen von Gebirgsgletschern, der Rest entfiel auf Verluste bei den großen Inlandeismassen der Polarregionen.

Nach jüngsten Beobachtungen schmilzt das Inlandeis Grönlands, das relativ weit südwärts in den immer wärmer werdenden Nordatlantik hineinreicht, inzwischen aber viel rascher ab als vermutet. Darauf ließen sich zwischen 2003 und 2008 bereits 40 Prozent des damaligen Meeresspiegelanstiegs um 2,5 Millimeter pro Jahr zurückführen – mit zunehmender Tendenz. Deshalb rechnen Klima- und Eisfor-

AUF EINEN BLICK

LAND UNTER?

1 Weil bei steigenden globalen Temperaturen das **Festlandeis** abschmilzt und sich das Meerwasser ausdehnt, erhöht sich durch den Klimawandel der **Meeresspiegel** – um möglicherweise zwei Meter bis zum Ende des Jahrhunderts.

2 Ungeschützte tief gelegene **Küstenregionen** – insbesondere **Deltagebiete** in Südostasien – und flache Inseln werden dadurch überflutet. In eingedeichten und etwas höher gelegenen Bereichen drohen **häufigere schwere Überschwemmungen** durch das **vermehrte Auftreten starker Stürme**.

3 In Europa und speziell Deutschland lässt sich ein Landverlust vermutlich vermeiden, allerdings nur mit hohem finanziellem und technischem Aufwand für die **Erhöhung der Deiche** und die **Installation von Pumpwerken**.

4 Allerdings droht die **Zerstörung wertvoller Naturräume** wie des Wattenmeers. Damit verschwindet zugleich ein natürlicher Puffer gegen Sturmfluten.

5 Am stärksten gefährdet sind wirtschaftlich schwache **Schwellen- und Entwicklungsländer**, bei denen ein wirksamer Küstenschutz aus finanziellen oder technischen Gründen meist nicht möglich ist.

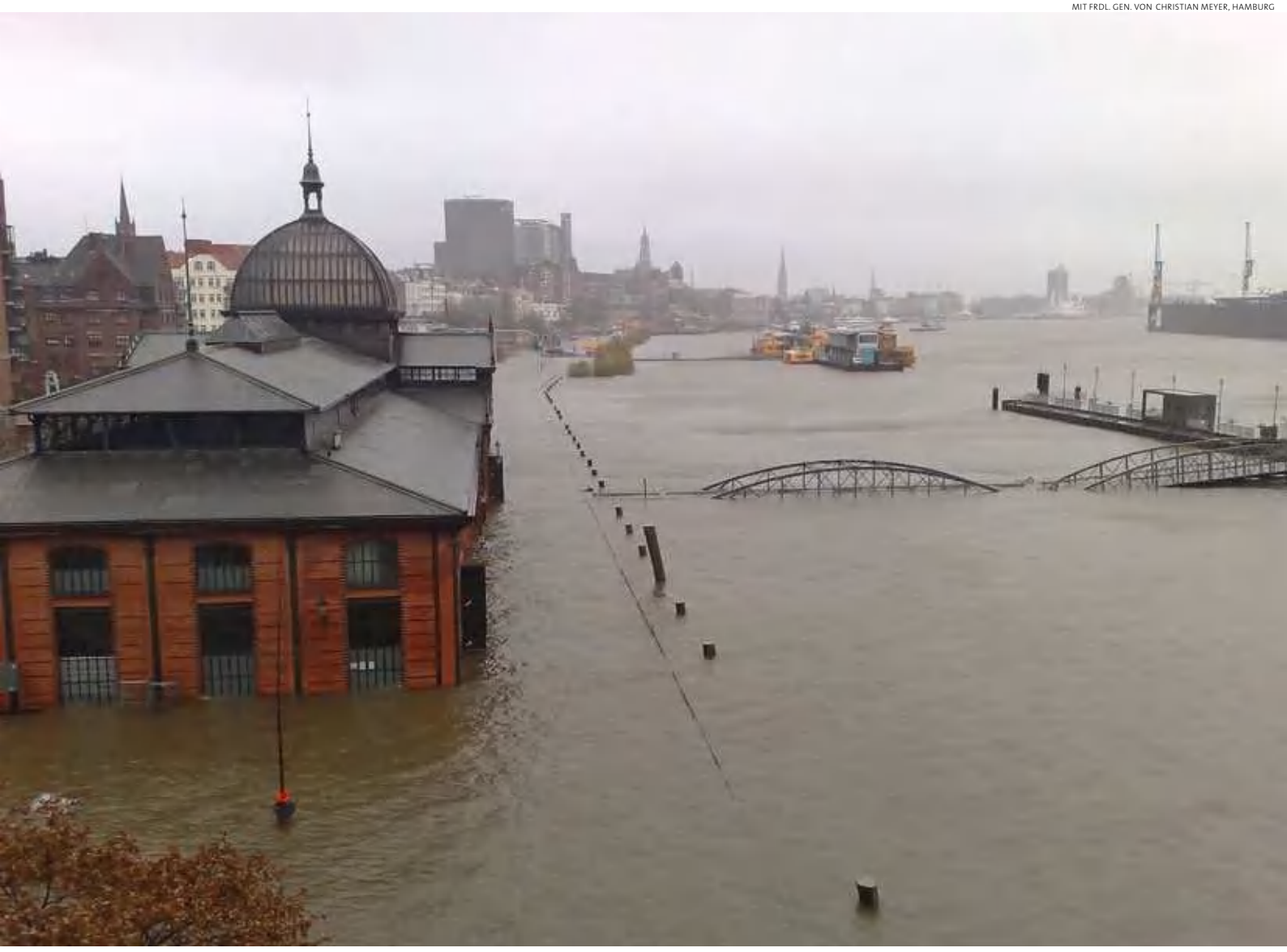
scher mit einer Erhöhung des Meeresspiegels um 80 bis 150 Zentimeter bis zum Ende des Jahrhunderts – deutlich mehr als die 20 bis 60 Zentimeter, die der UN-Klimarat IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) noch in seinem vierten Sachstandsbericht aus dem Jahr 2007 angibt. Sollte das gesamte Eis Grönlands abschmelzen, was bei anhaltend starkem Erwärmungstrend in 300 Jahren möglich scheint, betrüge der Anstieg sogar bis zu sieben Meter.

Allerdings gibt es deutliche lokale Abweichungen vom globalen Mittelwert. So heben sich manche Gebiete in den hohen Breiten, die während der Kaltzeit kilometerdicke Eisdecken trugen, wegen der Druckentlastung seit deren Abschmelzen immer noch und müssen daher keinen Meeresspiegelanstieg befürchten. Das gilt etwa für das nördliche Skandinavien. Dagegen senkt sich andernorts das Land – insbesondere in großen, dicht besiedelten Deltagebieten, wo die Entnahme von Grundwasser zur Verdichtung von Sedimenten führt. Dadurch kann sich hier der Meeresspiegel um bis zu mehrere Zentimeter pro Jahr erhöhen. So sieht beispielsweise das Chao-Phraya-Delta mit der 13-Millionen-Stadt Bangkok einer sehr ungewissen Zukunft entgegen – sogar an eine Verlegung der thailändischen Kapitale wird inzwischen gedacht.

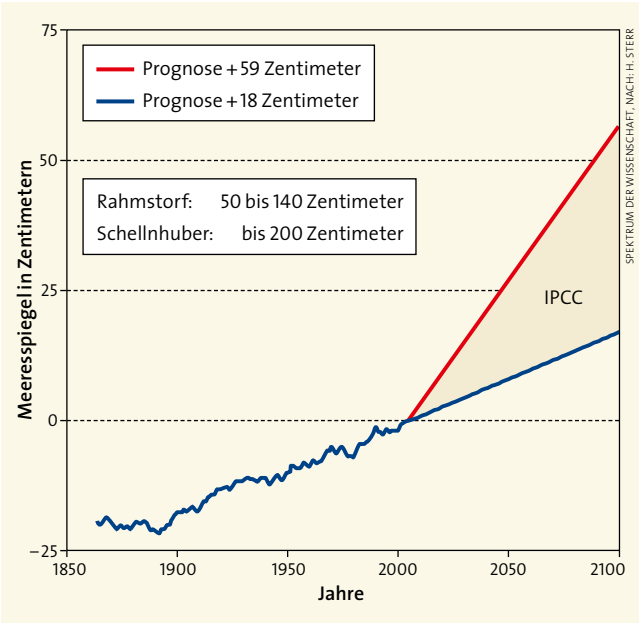
Generell sind Küstenräume als Zentren von Fischerei, Handel und Seeverkehr besonders dicht besiedelt. Hier reicht deshalb vielfach schon ein Anstieg des Meeresspiegels um einen halben bis einen Meter, um Großstädte und Ballungsgebiete in Bedrängnis zu bringen, zumal mit dem Klimawandel auch Stürme und Niederschläge zunehmen dürften. Bedroht sind zudem viele wertvolle oder einzigartige Küsten-

Schon heute steht der Hamburger Fischmarkt bei Sturmflut regelmäßig unter Wasser. Bei steigendem Meeresspiegel infolge der Erderwärmung wird die Überflutungsgefahr weltweit zunehmen.

MIT FRDL. GEN. VON CHRISTIAN MEYER, HAMBURG



Von 1870 bis 2005 ist der Meeresspiegel im weltweiten Durchschnitt um etwas mehr als 20 Zentimeter gestiegen. Durch die zunehmende Erderwärmung dürfte er sich laut dem vierten Sachstandsbericht des UN-Klimarats IPCC von 2007 bis Ende des Jahrhunderts um weitere 18 bis 59 Zentimeter erhöhen. Einige Klimaforscher wie Stefan Rahmstorf und Hans-Joachim Schellnhuber vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung erwarten sogar ein rascheres und stärkeres Abschmelzen des Grönlandeises, so dass der Anstieg des Meeresspiegels bis zu zwei Meter betragen könnte.



ökosysteme wie das Wattenmeer, tropische Korallenriffe und Mangrovenwälder, die sich in der Regel noch schwerer schützen lassen als Siedlungen und Häfen. Außer den Deltas gehören kleine, flache Inselarchipele wie die Malediven und zahlreiche Inseln in der Südsee und der Karibik zu den Hochrisikogebieten. Sie bieten weder Rückzugsräume für die Bevölkerung noch Baumaterial für Küstenschutzanlagen. Viele von ihnen dürften deshalb auf längere Sicht unbewohnbar werden oder ganz versinken.

Wie eine Betrachtung der Küstennationen mit der höchsten Bevölkerungsdichte in überflutungsgefährdeten Regionen zeigt, gehören Bangladesch und Vietnam, die beide in Südostasien liegen und große Deltagebiete haben, zu den besonders bedrohten Ländern. In den subtropischen Zonen verschlimmern regelmäßig auftretende schwere tropische Wirbelstürme die Lage zusätzlich, weil sie das Meerwasser großflächig mehrere Meter hoch auftürmen, während an Land sintflutartige Regenfälle niedergehen. So wurden im August 2005 beim Durchzug des Hurrikans Katrina das Mississippidelta und die Stadt New Orleans überflutet. Über 2000 Menschen starben bei dieser größten Naturkatastrophe in der jüngeren Geschichte der USA.

In Europa ist außer dem Podelta und der Lagune von Venedig die Nordseeküste von der Rheinmündung bis zur jütländischen Halbinsel am stärksten gefährdet. Dieser Küstenstreifen ist extrem flach, was der Name Niederlande bereits zum Ausdruck bringt. Zudem besteht er aus weichen Meeressedimenten, die mit zunehmendem Alter zusammensacken. Zugleich senkt sich hier als Gegenbewegung zu den sich hebenden Landmassen Skandinaviens der Boden leicht ab. Deshalb ist der Meerespiegel an der deutschen Nordseeküste im 20. Jahrhundert mit 25 Zentimetern deutlich stärker gestiegen als im globalen Mittel. Hinzu kommt, dass dieser Küstenabschnitt nach Norden bis Nordwesten exponiert ist. Aus dieser Richtung entwickeln sich meist die winterlichen Sturmfluten, die den Wasserstand an der Küste um mehrere Meter ansteigen lassen.

Deshalb wurde hier schon vor fast 1000 Jahren mit dem Bau von Schutzanlagen begonnen: zuerst Warften (künstliche Hügel), später Deichen. Trotz mittelalterlicher Sturmflut-

Spektrum der Wissenschaft *Extra* »Mensch, Natur, Technik« ist eine regelmäßige Sonderpublikation in Kooperation mit der VolkswagenStiftung

www.spektrum.de/mnt

Spektrum der Wissenschaft

Chefredakteur: Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.)
Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser (Monatshefte), Dr. Gerhard Trageser (Sonderhefte, Redakteur dieser Sonderpublikation)
Redaktion: Thilo Körkel, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Art Direction: Karsten Kramarczik
Editor-at-Large: Dr. Reinhard Breuer
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Redaktionsassistenz: Anja Albat-Nollau
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck

Erscheinungstermin: Spektrum der Wissenschaft 4/2012

VolkswagenStiftung

Leitung Kommunikation: Jens Rehländer
Projektmanagement Veranstaltungen: Anna Böhning

www.volkswagenstiftung.de

Spektrum der Wissenschaft CUSTOM PUBLISHING

Leitung: Dr. Joachim Schüring
Anschrift: Spektrum der Wissenschaft – Custom Publishing, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-612, Fax 06221 9126-5612;

www.spektrum.com/cp

Gesamtherstellung: L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2012 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt.

katastrophen war diese Küstenverteidigung bislang erfolgreich. Der Klimawandel bringt nun aber neue Herausforderungen mit sich.

Dies gilt in abgeschwächter Form auch für die Küstengebiete der südlichen Ostsee. Zwar sind sie von den Gletschern der letzten Eiszeit geprägt und damit hügeliger. Zudem fehlt das Gezeitenregime der Nordsee. Dennoch kommt es auch hier zu Überflutungen, wenn bei bestimmten Windverhältnissen das Ostseewasser wie in einer Badewanne hin- und hergeschaukelt wird. Dabei sind es vor allem die heute relativ seltenen Winde aus nordöstlicher Richtung, die Sturmfluten entstehen lassen. Sollten sich also durch den Klimawandel die Windfelder in unseren Breiten ändern, wären die Nord- und Ostseeküste unterschiedlich betroffen. Bisherigen Klimasimulationen zufolge sollten sich eher die Westwinde verstärken.

Häufigere Sturmfluten

Als wichtigste Effekte des Klimawandels, die viele tief liegende Küstenräume weltweit betreffen werden, gelten:

1. häufigere Extrempegelstände durch Anhebung des Ausgangsniveaus bei steigendem Meeresspiegel – ein Sturmflutwasserstand, der bislang statistisch nur alle 100 Jahre vorkam, wird künftig alle zehn Jahre oder noch öfter auftreten;
2. Rückstau des Oberwassers in Flussmündungen sowie Grundwasseranhebung mit Bodenvernässung in ufernahen Zonen;
3. dauerhafte großflächige Landverluste in Marschgebieten und Deltas durch Ertränken;
4. Vordringen von Meerwasser landeinwärts mit Versalzung von Böden und Grundwasser als Folge;
5. zunehmende Erosion von Stränden, Dünen und Kliffs an Lockergesteinsküsten;
6. möglicher Verlust von seeseitigen Ökosystemen wie Watten, Seegras- und Salzwiesen oder Mangrovenwäldern;
7. zunehmender Stress für Korallenriffe durch hohe Wassertemperaturen (Korallenbleiche) und beschleunigten Anstieg des Meeresspiegels.

Die beiden letztgenannten Effekte beeinträchtigen die Produktions- und Regulationsfunktionen von Küstenökosystemen, was leider oft ignoriert oder unterschätzt wird. Das Küstenmeer stellt für die Anwohner Rohstoffe, Nahrung, Lebens- und Erholungsraum oder Lagerstätten für Abfälle zur Verfügung. Außerdem spielen die von selbst ablaufenden Prozesse der Bioregulation im aquatischen Milieu eine wichtige Rolle. So gelänge es ohne die natürliche Filter- und Pufferwirkung von Feuchtgebieten oder Dünen nur mit sehr hohen Kosten und aufwändigen Technologien, Nähr- und Schadstoffe ähnlich wirksam zurückzuhalten. Der Klimawandel zieht zahlreiche Einschränkungen dieser Ökosystemdienstleistungen nach sich, was bei der Klimafolgenabschätzung bislang zu wenig beachtet wurde.

Die unter 1. bis 5. genannten Effekte bedrohen oder beeinträchtigen direkt das menschliche Leben und Wirtschaften in der Küstenzone. Kurzfristig nimmt die Überflutungsgefahr zu, und die Küstenerosion beschleunigt sich. Längerfristig werden bei weiter steigendem Meeresspiegel Vernässung und Versalzung des Bodens an Bedeutung gewinnen.

Ob und wie gut sich diese Bedrohungen beherrschen lassen, hängt vom Typ der Küstenlandschaft ab – sowie davon, was die betroffenen Regionen an materiellen Ressourcen aufbieten können. Generell gibt es zwei Möglichkeiten: Anpassung oder Verteidigung. Im ersten Fall versucht man, der Gefahr auszuweichen – sei es durch Rückzug aus überflutungsgefährdeten Gebieten oder durch den Bau von Häusern auf Warften oder Pfählen. Das praktiziert die Bevölkerung in vielen Entwicklungsländern außerhalb von Großstädten bis heute. Sie kann so flexibel auf eine Zuspitzung der Situation reagieren. Bei wachsenden Städten in exponierten Lagen ist ein solches Ausweichen aber kaum möglich.

Auf die Verteidigungsstrategie setzen dagegen Gebiete mit einer langen Küstenschutzhistorie, wie sie besonders in Europa zu finden sind. Vom Rhein-Maas-Mündungsgebiet bis zum nördlichen Ende des Wattenmeers bei Esbjerg in Dänemark ist die Festlandküste durchgehend eingedeicht; Ähnliches gilt für Marschenküsten im südlichen England sowie in Frankreich, Italien und Spanien. Trotz wiederholter Sturm-

Norddeutschland und der Klimawandel im Überblick

- Deutschland hat insgesamt 3700 Kilometer Küste.
- Davon entfallen auf die Nordsee 1580 und auf die Ostsee 2120 Kilometer (inklusive Boddengewässer und Inseln).
- Überflutungsgefährdet sind die Landflächen niedriger als fünf Meter über Normalnull an der Nordsee- und drei Meter über Normalnull an der Ostseeküste.
- Dies entspricht einer Gesamtfläche von 13 900 Quadratkilometern; ein Großteil davon ist derzeit durch Deiche geschützt.
- Im Überflutungsgebiet leben 3,2 Millionen Menschen.
- Die volkswirtschaftlichen Werte im Überflutungsgebiet belaufen sich auf mehr als 500 Milliarden Euro.
- Im Überflutungsgebiet sind mehr als eine Million Arbeitsplätze angesiedelt.
- Gefahren drohen Großstädten an der Nordsee (Hamburg, Bremen) durch Sturmfluten.
- Auch Ostseestädte wie Kiel, Lübeck, Rostock und Greifswald sind – mangels Deichschutz – teilweise überflutungsgefährdet.
- Den Tourismuszentren an Nord- und Ostsee droht der Verlust ihrer Strände.
- Die Kosten für Küstenschutzmaßnahmen wie Deichbau und Sandvorspülungen werden stark steigen.
- Langfristig können große Teile der ökologisch wertvollen Salzwiesen und Wattflächen verloren gehen.

flutkatastrophen konnte hier bislang eine starre Verteidigungslinie gehalten werden. Das Beispiel der Niederlande, wo große Flächen schon länger unterhalb des Meeresspiegels liegen, zeigt aber auch, welch immenser technischer und finanzieller Aufwand damit verbunden ist – vor allem für die Drainage der Polder mittels Pumpwerken.

Bedrohung für Wattenmeer und Küstentourismus

An der deutschen Nordseeküste liegen die eingedeichten Marschflächen bisher größtenteils noch so hoch, dass das aus dem Hinterland kommende Wasser bei Ebbe mit Gefälle in die Nordsee fließt. Wenn der Meeresspiegel um einen halben bis einen Meter ansteigt, müssen sie aber auch hier zu Lande mit hohem Energie- und Kostenaufwand künstlich entwässert werden. Zugleich sind die vorhandenen Deiche so zu verstärken und zu erhöhen, dass sie immer noch ausreichende Sicherheit bieten.

Die Küstenschutzbehörden der norddeutschen Länder halten das immerhin für möglich. Trotzdem wird auch über Vorgehensweisen nachgedacht, die der natürlichen Küstenentwicklung außerhalb der Siedlungen mehr Raum geben. Anderenfalls könnte nämlich das Wattenmeer früher oder später ganz verschwinden, eingeklemmt zwischen der rasch ansteigenden Nordsee auf der einen und den massiven Deichbauten auf der anderen Seite. Damit würde nicht nur ein Weltnaturerbe verloren gehen, sondern auch ein natürlicher Puffer, der die Deiche, das Festland und die küstennahen Siedlungen bislang vor noch größeren Sturmflutschäden bewahrt hat. Die Deichsicherheit geriete dadurch also weiter in Gefahr. Abgesehen davon ist das Watt als einzigartiger Naturraum auch für den Küstentourismus von herausragender Bedeutung.

Ähnlich gravierend und schwierig zu meistern ist das zweite Problem: die bei steigendem Meeresspiegel immer rascher fortschreitende Küstenerosion. Sie betrifft vor allem die sandigen Brandungsküsten, deren Strände das wichtigste Kapital für den wirtschaftlich sehr bedeutsamen Küstentourismus sind – nicht nur an der Nord- und Ostsee, sondern an vielen Orten weltweit.

Auf Sylt werden schon seit den 1990er Jahren jährlich rund zehn Millionen Euro dafür aufgewendet, mit Sandaufspülungen die ständigen Sandverluste an der Westseite zu bekämpfen. Dabei ist diese Insel noch in der glücklichen Lage, dass es vor ihrer Küste ausreichend Sand auf dem Boden der Nordsee gibt, den Schiffe direkt über Rohrleitungen auf den Strand pumpen können. An der Ostsee geht das nicht so einfach. Hier müsste der Sand an vielen Stellen per Schiff oder Lastkraftwagen herantransportiert werden, was jedoch die finanziellen Möglichkeiten der kleineren Küstengemeinden übersteigen würde. Für den Küstentourismus in Deutschland zeichnen sich mittel- bis langfristig also massive Probleme ab.

Weltweit nimmt der Aufwand für Schutzmaßnahmen gegen den ansteigenden Meeresspiegel und die häufiger auftretenden Sturmfluten schon jetzt dramatisch zu. Wohlhabendere Nationen wie die Niederlande und Deutschland verfügen wohl noch auf absehbare Zeit über die finanziellen und technischen Mittel, die Überflutungsrisiken und Landverluste einzudämmen. Aber selbst hier zeigen sich bereits ernst zu nehmende Defizite, beispielsweise bei der Hochwassersicherung in Küstenstädten wie Hamburg, Kiel oder Lübeck. Langfristig müssen wohl Kosten-Nutzen-Überlegungen angestellt werden, wie sich die begrenzten Mittel am effektivsten einsetzen lassen und wo höhere Risiken in Kauf zu nehmen sind.

Ärmere Länder in der Dritten Welt trifft der Anstieg des Meeresspiegels wesentlich stärker. So gibt es in den dicht besiedelten Flussdeltas von Vietnam, Bangladesch oder Ägypten kaum adäquate Deiche und Schutzanlagen. Auf Grund der natürlichen Gegebenheiten wäre hier die Errichtung solcher Bauwerke selbst mit internationaler Finanzhilfe ohnehin sehr schwierig. Auf Inselarchipelen wie den Malediven oder den Bahamas dürfte ein angemessener Hochwasser- und Erosionsschutz mangels Platz und Baumaterial sogar prinzipiell unmöglich sein. Wie so oft leiden also ausgerechnet die wirtschaftlich schwachen Schwellen- und Entwicklungsländer am stärksten unter der fortschreitenden globalen Erwärmung. ~

DER AUTOR

Horst Sterr ist Professor für Physische Geografie und Küstengeografie an der Universität Kiel. Er hat Geografie und Geologie studiert – zunächst an der Universität Regensburg und später an der University of Colorado in Boulder, wo er 1980 auch promovierte. Von 1992 bis 1997 war er wissenschaftlicher Leiter des Verbundvorhabens »Klimaänderungen & Küste« an der Universität Oldenburg. Sein Forschungsschwerpunkt ist die Klima- und Küstengeografie.

QUELLEN

Brückner, H. et al.: Trifft es nur die Armen? Der Meeresspiegelanstieg und seine Folgen für die Küstentiefländer der Erde. In: Ehlers, E., Leser, H. (Hg.): Geographie heute für die Welt von morgen. Klett-Perthes, Gotha 2002, S. 90–98

Schirmer, M. et al.: Meeresspiegelanstieg und hydrologische Probleme der Küstenzone. In: Lozán, J. L. et al. (Hg.): Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle? 3. Auflage 2011

Sterr, H. et al.: Risikomanagement im Küstenschutz in Norddeutschland. In: Felgentreff, C., Glade, T. (Hg.): Naturrisiken und Sozialkatastrophen. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2007, S. 337–352

Sterr, H.: Assessment of Vulnerability and Adaptation to Sea-Level Rise for the Coastal Zone of Germany. In: Nicholls, R. (Hg.): Global Overview of Coastal Vulnerability and Adaptation to Sea-Level Rise. In: Journal of Coastal Research Special Issue 24, S. 380–393, 2008

Sterr, H. et al.: Die ungewisse Zukunft der Küsten. In: Maribus (Hg.): World Ocean Review. Mare, Hamburg 2011

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1142730**

Wie hart trifft es Deutschland?

Den Ergebnissen regionaler Klimamodelle zufolge werden unsere Sommer heißer und die Winter feuchter – und die Gefahr extremer Niederschläge nimmt zu.

Von Paul Becker, Thomas Deutschländer und Florian Imbery

Laut UNO-Klimarat IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) bestehen kaum noch Zweifel: Menschliches Handeln beeinflusst unser Klima nachhaltig. Die untere Erdatmosphäre hat sich zwischen 1906 und 2005 global um 0,74 Grad Celsius erwärmt – mit deutlich steigender Tendenz seit den 1980er Jahren. Wenn sich die Aufheizung in den kommenden Dekaden weiter beschleunigt, wird das unser aller Leben maßgeblich beeinflussen. Was uns erwartet, können Wissenschaftler mit Computersimulationen abschätzen, die möglichst viele Komponenten des irdischen Klimasystems nachbilden. Zunächst wurden hierfür ausschließlich globale Modelle verwendet, welche die durchschnittliche Erwärmung der Erde insgesamt erfassten. Für spezielle Aussagen zur Klimaentwicklung in eng begrenzten Gebieten haben sie in aller Regel jedoch nicht die nötige räumliche Auflösung. Um auch solche detaillierteren Informationen zu erhalten, arbeiten Klimaforscher seit rund 20 Jahren an der Entwicklung regionaler Modelle.

Doch auch sie geben meist noch keinen Aufschluss darüber, wie sich die Klimaänderung auf die verschiedenen Lebensbereiche auswirken wird. Dafür bedarf es zusätzlich so genannter Wirkmodelle, die beispielsweise den Einfluss auf die Land- und Forstwirtschaft oder auf den Wasserhaushalt erfassen. Erst sie erlauben es, die Folgen des Klimawandels auf den verschiedensten Gebieten zu simulieren, so dass sich optimale Anpassungsstrategien entwerfen lassen.

Szenarien für die Wirtschaftsentwicklung

Was die Klimamodelle liefern, sind nach offiziellem Sprachgebrauch keine Vorhersagen, sondern Projektionen. Die Wortwahl bringt die vielen Unwägbarkeiten zum Ausdruck, die in die Berechnungen eingehen. Dazu zählen insbesondere die zukünftigen gesellschaftlichen, ökonomischen und technologischen Entwicklungen. Diese entscheiden über den weltweiten Ausstoß an Treibhausgasen wie Kohlendioxid, die für die momentane Erderwärmung wesentlich mitverantwortlich sind. Im letzten IPCC-Bericht waren es vier Familien aus so genannten SRES-Szenarien (Special Report on Emission Scenarios), welche die möglichen Emissionen solcher Gase bis Ende dieses Jahrhundert erfassten. Sie trugen die Bezeichnungen A1, A2, B1 und B2 und unterschieden sich im Wesentlichen in der angenommenen wirtschaftlichen

AUF EINEN BLICK

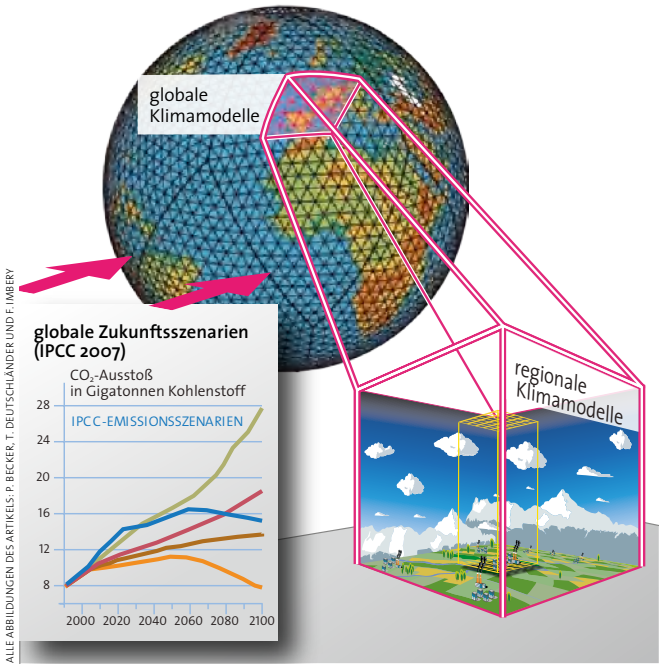
HEISSE SOMMER, NASSE WINTER

1 **Globale Klimamodelle** haben räumliche Auflösungen von 200 bis 500 Kilometern und erlauben deshalb keine Aussagen für einzelne Regionen. Das leisten **regionale Modelle**, die auf der Grundlage der globalen Daten und unter Berücksichtigung **topografischer Besonderheiten** Trends für kleinere Gebiete errechnen.

2 Um **zuverlässige Aussagen** zu erhalten, bündeln Klimaforscher die Ergebnisse möglichst vieler Klimamodelle und werten sie kollektiv aus – eine Vorgehensweise, die als **Ensembleansatz** bezeichnet wird.

3 Auf der Basis von 19 regionalen Klimaprojektionen präsentiert der **Deutsche Klimaatlas** wahrscheinliche **Szenarien** für das zukünftige Klima in Deutschland im Vergleich zu den heutigen Verhältnissen.

4 Demnach steigt bis Ende dieses Jahrhunderts die Durchschnittstemperatur in der Bundesrepublik um bis zu vier Grad Celsius. Die Sommer werden trockener und die Winter feuchter. Die Zahl der **heißen Tage** mit einer Höchsttemperatur von mindestens 30 Grad Celsius verdreifacht sich. Vor allem im Winter nehmen **Starkniederschläge** zu – und damit die **Überschwemmungsgefahren**.



ALLE ABBILDUNGEN DES ARTIKELS: P. BECKER, T. DEUTSCHLÄNDER UND F. IMBERY

Regionale Klimamodelle basieren zwar auf globalen Emissionsszenarien des IPCC, können aber kleinräumige geografische Gegebenheiten berücksichtigen und Entwicklungen in einzelnen Regionen simulieren.

und demografischen Entwicklung sowie im Grad der Globalisierung.

So geht A1 von einem sehr schnellen Wirtschaftswachstum und der raschen Einführung neuer, effizienterer Technologien aus, wobei die Weltbevölkerung noch bis Mitte des 21. Jahrhunderts zu- und danach abnehmen soll. Zu dieser Familie gehört insbesondere das als moderat angesehene und am häufigsten verwendete A1B-Szenario, das sich durch eine ausgewogene Nutzung aller Energiequellen auszeichnet.

Die SRES-Szenarien sind durch die Konzentration an Kohlendioxidäquivalenten in parts per million (ppm, millionstel Anteile) im Simulationszeitraum charakterisiert. Im fünften IPCC-Sachstandsbericht, dessen Publikation 2014 geplant ist, stehen sie jedoch nicht mehr im Vordergrund. An ihre Stelle treten Representative Concentration Pathways (RCP, repräsentative Konzentrationsverläufe). Sie geben die Änderung des so genannten Strahlungsantriebs in Watt pro Quadratmeter wieder und beinhalten folglich nicht nur die Treibhausgasemissionen, sondern – neben den natürlichen Einflüssen – alle sozioökonomischen Faktoren, welche den Strahlungshaushalt der Erde beeinflussen. Rückkopplungen zwischen Prozessen, die in den Modellen der einzelnen Forschungsdisziplinen gesondert betrachtet werden, lassen sich dadurch besser erfassen. Rechnungen mit RCP-Szenarien sind auch insofern flexibler, als sie beispielsweise mögliche Anpassungsstrategien bereits berücksichtigen können. Erste Klimaprojektionen auf ihrer Basis werden noch im Lauf dieses Jahres veröffentlicht.

Globale Klimamodelle simulieren die wesentlichen physikalischen Vorgänge in der Atmosphäre, in den Ozeanen und auf der Erdoberfläche sowie die komplexen Wechselwirkungen zwischen diesen Teilsystemen auf Rechengittern mit einer Auflösung von bislang etwa 200 bis 500 Kilometern. Dabei berechnen sie die Reaktion des Klimasystems auf Veränderungen externer Randbedingungen wie der Strahlungsintensität der Sonne und der erwarteten Emission klimarelevanter Treibhausgase. Trotz zahlreicher Unterschiede zwischen den einzelnen Modellen sind ihre wesentlichen Aussagen vergleichbar. Alle Simulationen, die im IPCC-Bericht von 2007 diskutiert werden, ergeben auf Basis der SRES-Szenarien beispielsweise einen mittleren globalen Temperaturanstieg von zwei bis vier Grad Celsius zum Ende des 21. Jahrhunderts sowie die Ausbreitung von Wüsten und eine Umverteilung des Niederschlags.

Globale Klimamodelle sind so aufwändig, dass sie trotz der enormen heute verfügbaren Rechenleistung kaum kleinräumige Veränderungen mit hoher zeitlicher Auflösung simulieren können. Um Aussagen darüber zu erhalten, muss man ihre Ergebnisse auf die regionale Ebene »herunterrechnen«. Das leisten regionale Klimamodelle, die nur einen Ausschnitt der Erdoberfläche betrachten, dafür aber detaillierter sind. Ihre Auflösung liegt derzeit in der Regel im Bereich zwischen 10 und 50 Kilometern. Sie berücksichtigen unter anderem Faktoren wie den Einfluss von Gebirgen oder Feinheiten der Landnutzung. Dadurch zeichnen sie ein differenzierteres Bild und liefern beispielsweise auch genauere Angaben über die räumliche Verteilung und zeitliche Variabilität des Niederschlags.

Wo liegen die Unsicherheiten?

Für alle globalen wie regionalen Klimamodelle gilt, dass sich nicht sagen lässt, welches davon das beste ist. Jedes hat seine besonderen Stärken und Schwächen und liefert unter den jeweiligen Anfangs- und Randbedingungen leicht unterschiedliche Klimatrends. Die daraus resultierende Bandbreite an Ergebnissen spiegelt ein gewisses Maß an Unsicherheit wider, die es bei der Interpretation von Klimaprojektionen zu beachten gilt.

Die Ungewissheit speist sich aus drei grundsätzlichen Quellen:

- der hypothetischen Natur der zu Grunde liegenden Emissionsszenarien, weil sich die sozioökonomische Entwicklung der Welt nur schwer abschätzen lässt;
- den Vereinfachungen in den Modellen selbst, die unmöglich alle relevanten physikalischen Prozesse in der Natur erfassen können;
- und den natürlichen Klimaschwankungen auf Grund der chaotischen Dynamik des Klimas.

Zudem sind bestimmte Abläufe und Kopplungen im Klimasystem bis heute nicht vollständig verstanden oder können nicht in den Modellen abgebildet werden. Die extrem komplexen physikalischen Prozesse in der Atmosphäre und ihre gegenseitigen Kopplungen immer genauer wiederzugeben,

ist daher eine stetige Herausforderung für die Klimamodellierer.

Auf Grund der geschilderten Unsicherheiten bieten einzelne Modellläufe keine ausreichende Basis für die Interpretation und Anwendung der Ergebnisse oder für die Planung von Anpassungsmaßnahmen. Um ein besser abgesichertes Fundament zu schaffen, betrachten Klimaforscher deshalb möglichst viele Projektionen und werten sie kollektiv aus – eine Vorgehensweise, die als Ensembleansatz bezeichnet wird.

Das 2004 ins Leben gerufene EU-Projekt ENSEMBLES bezweckte, die Voraussetzungen für die Anwendung dieser Methode in Europa zu verbessern. Dazu wurden die globalen und regionalen Klimamodelle mehrerer Forschungseinrichtungen miteinander kombiniert, um ein möglichst verlässliches Resultat zu gewährleisten. Für Deutschland stehen aktuell mehr als 50 Ergebnisse regionaler Klimasimulationen zur Verfügung. Das im Folgenden vorgestellte Ensemble umfasst 19 regionale Klimaprojektionen, die auf dem schon erwähnten SRES-Szenario A1B beruhen und bis zum Ende des 21. Jahrhunderts reichen.

> Bis Ende des Jahrhunderts werden die Obstbäume 15 Tage früher blühen! Damit vergrößert sich die Gefahr durch Spätfröste

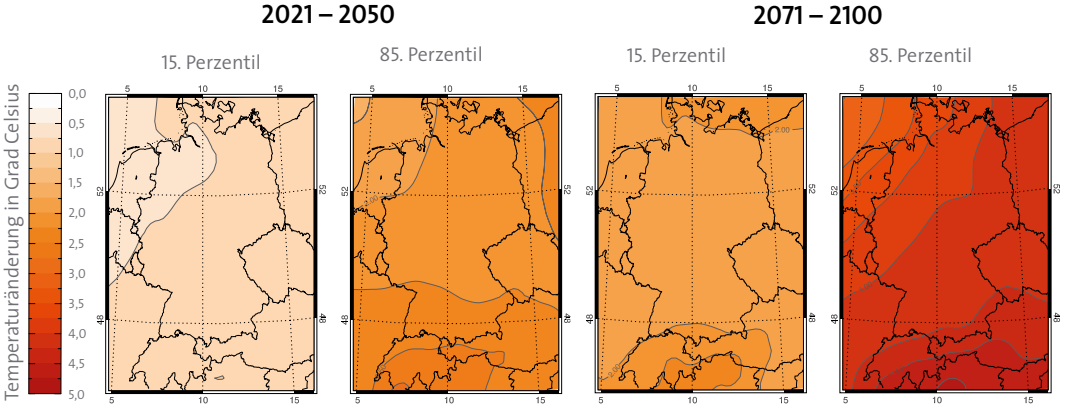
Die Trends bei Temperatur und Niederschlag

Zur Darstellung der Ergebnisse dienen so genannte Perzentile. Hierbei handelt es sich um Schwellenwerte, die nur von einer bestimmten Anzahl aller ausgewerteten Simulationen überschritten werden. Gewöhnlich betrachten Klimatologen eine konservative untere Grenze, die so gut wie sicher überschritten wird, und eine obere Schranke für unwahrscheinlich drastische Änderungen. Die tatsächliche Klimaänderung sollte innerhalb dieser Spanne liegen.

Das 15. Perzentil als untere Schwelle beschreibt Effekte, welche nicht größer als diejenigen sind, die sich aus mindestens 15 Prozent der Projektionen ergeben. Bei 85 Prozent der Simulationen fallen die Änderungen dagegen stärker aus. An der oberen Grenze, dem 85. Perzentil, verhält es sich genau umgekehrt: Es umfasst alle Änderungen, die höchstens gleich dem sind, was 85 Prozent der Projektionen vorhersagen; nur 15 Prozent der Modelle ergeben noch stärkere Effekte. Der Bereich zwischen den beiden Schwellenwerten deckt somit 70 Prozent der Ergebnisse des betrachteten Ensembles ab.

Für die Endpunkte dieser Spanne stellt der Deutsche Klimaatlas (www.dwd.de/klimaatlas) auf der Basis des erwähnten Ensembles von 19 regionalen Klimaprojektionen dar, wie sich das Klima in der Bundesrepublik gegenüber dem Zeitraum zwischen 1961 und 1990 voraussichtlich ändern wird. Demnach wird die Lufttemperatur im Jahresmittel bis 2050 gemäß dem 15. Perzentil um mindestens ein halbes Grad steigen (Bild unten). Laut 85. Perzentil beträgt die Zunahme dagegen zwei Grad – in Süddeutschland etwas mehr und in Norddeutschland etwas weniger. Für den Zeitraum zwischen 2071 und 2100 ist für die gesamte Bundesrepublik mindestens eine Erhöhung um 1,5 Grad zu erwarten (15. Perzentil). Der Anstieg kann aber sogar 3,5 Grad in Norddeutschland und 4 in Süddeutschland betragen (85. Perzentil). Hier zu Lande wird es also erheblich wärmer.

Beim Niederschlag ist zwischen den Jahreszeiten zu differenzieren. Die Winter dürften bis zum Ende des Jahrhunderts in ganz Deutschland im Mittel feuchter, die Sommer dagegen trockener ausfallen. Gemäß den ausgewerteten Klimaprojektionen werden die mittleren Regenfälle in der heißen Jahreszeit bis 2050 erst einmal noch relativ wenig, im letzten Quartal dann aber leicht bis mäßig zurückgehen – um bis zu 20 Prozent (Bild rechts oben). In der ersten Jahrhunderthälfte könnten die Niederschlagsmengen während der Monate Juni, Juli und August in einigen Regionen auch fast unverändert bleiben. Im Winter ist dagegen mit einer Zunahme um bis zu 10 Prozent in naher und bis zu 15 Prozent in ferner Zukunft zu rechnen.



Regionale Klimamodelle sagen für Deutschland einen Anstieg der Lufttemperatur im Jahresmittel voraus. Das 15. Perzentil und das 85. Perzentil grenzen den Bereich der wahrscheinlichsten Werte ein.

Eine besonders wichtige Frage lautet, ob durch den Klimawandel ungewöhnliche Witterungsbedingungen zunehmen. Viele Bereiche unserer Gesellschaft sind ausgesprochen anfällig gegenüber Wetterextremen und ihren unmittelbaren Folgen. Das gilt etwa für den Bevölkerungsschutz oder die Versicherungswirtschaft. Deshalb ist es von großer Bedeutung, möglichst frühzeitig zu erfahren, ob es durch den globalen Temperaturanstieg öfter zu Hitzewellen, Starkniederschlägen und schweren Stürmen kommt.

Erste Auswertungen eines Teilensembles der insgesamt zur Verfügung stehenden regionalen Klimaprojektionen für Deutschland bestätigen das. Ziemlich eindeutig ist das Bild bei der Temperatur. Hitzephasen dürften sehr viel öfter auftreten und länger andauern. Den vorliegenden Simulationen zufolge wird die jährliche Anzahl der Tage mit einer Höchsttemperatur von mindestens 30 Grad Celsius in den kommenden vier Jahrzehnten in Norddeutschland um bis zu 10 und in Süddeutschland um bis zu 15 steigen. Das entspricht annähernd einer Verdopplung gegenüber der aktuell gültigen Klimanormalperiode von 1961–1990. Bis zum Ende des Jahrhunderts könnte sich die Zahl der heißen Tage in Norddeutschland sogar um bis zu 15 und in Süddeutschland um bis zu 35 Tage erhöhen – mehr als eine Verdreifachung des bisherigen Wertes.

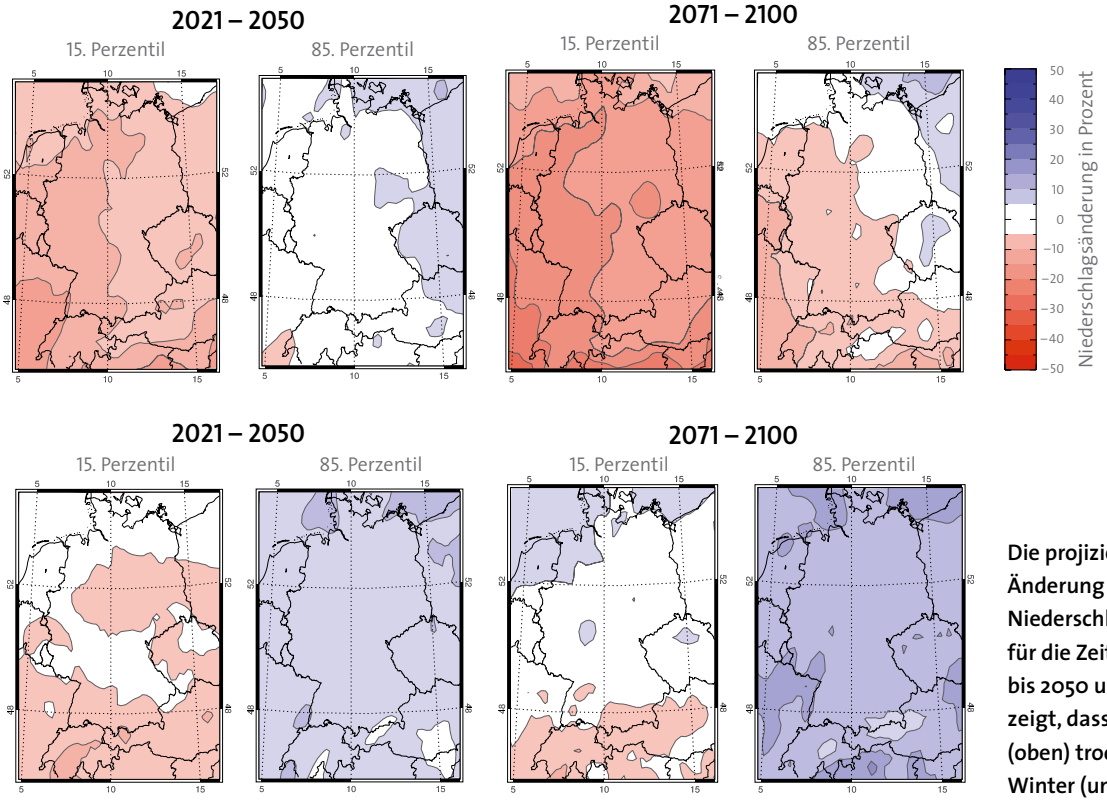
Auch Starkniederschläge – hier definiert als Niederschlagsereignisse oberhalb eines vorab festgelegten, jedoch regional unterschiedlichen Schwellenwertes – werden voraussichtlich öfter auftreten. Das gilt vor allem für die kalte Jahreszeit, wo sich ihre Zahl in den küstennahen Regionen bis 2100 gegenüber dem Zeitraum von 1961 bis 1990 annähernd verdoppeln dürfte. In den übrigen Regionen bleibt es vermutlich bei einem moderaten Anstieg um bis zu 50 Prozent. Nur im Alpenbereich scheint sich an der Häufigkeit der Starkniederschläge wenig zu ändern.

Unliebsame Folgen für die Landwirtschaft

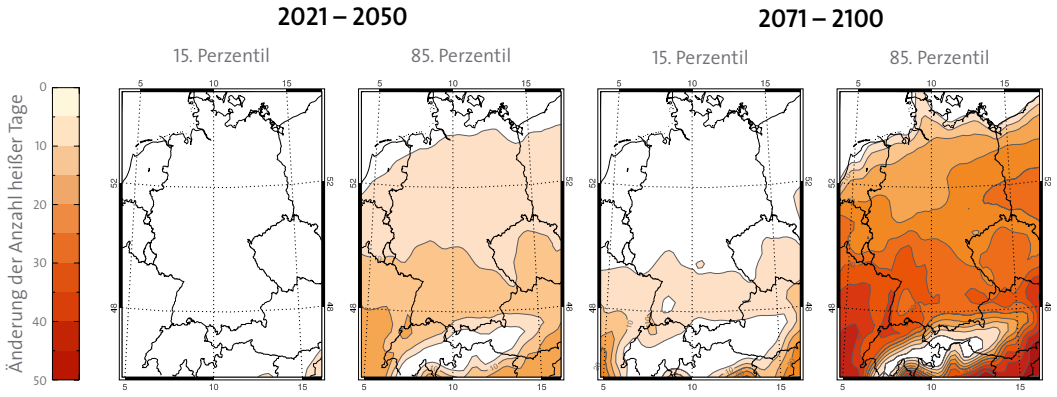
Für die Sommermonate sagt die Mehrzahl der ausgewerteten Klimaprojektionen entgegen dem allgemeinen Trend zu größerer Trockenheit ebenfalls mehr heftige Regenfälle voraus. Das würde zum Beispiel die Landwirtschaft treffen. Schließlich gehört sie zu den am stärksten vom Wetter abhängigen Wirtschaftszweigen: Knapp 80 Prozent der Schwankungen bei den Ernteerträgen in Deutschland lassen sich auf den Witterungsverlauf zurückführen.

Durch die höhere Lufttemperatur wird sich auch der Vegetationsbeginn verschieben. Auswertungen von 21 regionalen Klimaprojektionen lassen erwarten, dass er bis zum Ende des Jahrhunderts im Mittel etwa 15 Tage früher stattfindet. Damit vergrößert sich die von Spätfrösten ausgehende Gefahr zum Beispiel für die Obstblüte.

Der Klimawandel betrifft nicht nur die Landwirtschaft. Er wird sich auch auf viele andere Bereiche auswirken, namentlich das Bauwesen. Dabei geht es vor allem um die Witterungsbeanspruchung von Gebäuden. Da diese meist über viele Jahrzehnte Bestand haben, ist bei ihrer Konzeption und



Die projizierte prozentuale Änderung der mittleren Niederschläge in Deutschland für die Zeiträume von 2021 bis 2050 und von 2071 bis 2100 zeigt, dass es im Sommer (oben) trockener und im Winter (unten) feuchter wird.



Den Projektionen regionaler Klimamodelle zufolge wird sich in Deutschland die Anzahl heißer Tage, an denen die Temperatur mindestens 30 Grad erreicht, bis zur Mitte des Jahrhunderts verdoppeln und bis 2100 sogar verdreifachen.

Ausführung die zukünftige Entwicklung des Klimas zu berücksichtigen. Beispielsweise erfordern steigende Lufttemperaturen eine bessere Isolierung bei Dächern, Wänden und Fenstern sowie effizientere Methoden zur Klimatisierung des Gebäudeinneren.

Beeinflusst wird auch die Möglichkeit des Bauens selbst – hier allerdings zum Positiven. So dürfte sich die Zahl der Tage mit »erschwerter Bautätigkeit« wegen schlechter Witterung verringern – einer Auswertung der Klimaprojektionen zufolge bis Ende des Jahrhunderts um bis zu zehn Tage pro Jahr. Am stärksten profitieren werden wohl der Osten und Süden Deutschlands.

Langfristige Vorhersagen der Witterung

Neben den langfristigen Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert gewinnen kurzfristigere Prognosen für die Politik- und Wirtschaftsplanung immer größere Bedeutung. Jenseits der Wettervorhersage für die nächsten Tage klafft bisher im Zeitbereich zwischen etwa zehn Tagen und wenigen Jahrzehnten eine große Lücke. Sie zu schließen ist ein aktueller Forschungsschwerpunkt der Meteorologen. Zwar gelingt es nicht, für diesen Vorhersagehorizont das genaue Wetter im Einzelnen zu berechnen. Immerhin aber sind Aussagen zur Häufigkeit verschiedener Wetterlagen möglich. Daraus lässt sich wiederum der grundsätzliche Witterungscharakter für eine bestimmte Region ableiten. Solche Abschätzungen sind sehr wichtig für Anpassungsstrategien, Risikomanagement und die Planung von Infrastrukturmaßnahmen.

Die erreichbare Genauigkeit nimmt natürlich ab, je weiter man in die Zukunft blickt. Bei der Monats- und Jahreszeitenvorhersage gelingt es noch bis zu einem gewissen Grad, den tatsächlichen Witterungsverlauf zu erfassen. So lassen sich für einige meteorologische Messgrößen wie die Temperatur oder den Niederschlag die mutmaßlichen Abweichungen von den normalen Werten für eine Jahreszeit inzwischen im Voraus bestimmen. Bei der Monatsvorhersage geschieht das typischerweise für einzelne Kalenderwochen, im Falle saisonaler Prognosen zumeist auf Basis von Kalendermonaten.

Klimasimulationen erlauben dagegen nur, die über längere Zeiträume hinweg vorherrschenden großräumigen atmosphärischen Strömungsverhältnisse zu berechnen. Doch auch daraus lassen sich zumindest qualitative Aussagen über die Witterungsverhältnisse für Regionen unterhalb der Größenordnung ganzer Kontinente ableiten. Es ist also prinzipiell möglich vorherzusagen, ob etwa in Deutschland in einzelnen Jahren besonders kalte Winter oder besonders heiße Sommer auftreten. Ebenso besteht die Hoffnung, Dürreperioden oder großräumige Flutereignisse frühzeitig zu erkennen. Doch gleichgültig, ob die Vorhersage das nächste Vierteljahr oder Jahrzehnt betrifft – immer handelt es sich um eine reine Wahrscheinlichkeitsaussage.

DIE AUTOREN

Paul Becker (links) ist Vizepräsident des Deutschen Wetterdienstes (DWD) in Offenbach und leitet dort den Geschäftsbereich Klima und Umwelt. **Thomas Deutschländer** (Mitte) und **Florian Imbery** sind wissenschaftliche Mitarbeiter in der Abteilung Klima- und Umweltberatung des DWD und Experten für statistische beziehungsweise hydrologische Fragestellungen.

QUELLEN

Mitchell, J. F. B., van der Linden, P. (Hg.): ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of Research and Results from the ENSEMBLES Project. Met Office Hadley Centre, Exeter 2009
Moss, R. H. et al.: The Next Generation of Scenarios for Climate Change Research and Assessment. In: Nature 463, S. 747–756, 2010
Nakicenovic, N., Swart, R. (Hg.): Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2000

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1142726**

Wärmeinseln im Treibhaus

Städte haben ihr eigenes Klima. So liegen die Temperaturen dort meist höher als im Umland. Deshalb lohnt es sich, die Auswirkungen der globalen Erwärmung auf unsere Metropolen gesondert zu betrachten – auch im Hinblick darauf, wie Städteplaner sich schon heute darauf vorbereiten sollten.

Von K. Heinke Schlünzen

Weltweit lebt inzwischen jeder zweite Mensch in einer Stadt; in Deutschland gilt das sogar für drei von vier Einwohnern (Zahlen der Vereinten Nationen für alle Länder unter http://esa.un.org/unup). Bis zur Mitte des Jahrhunderts wird die Verstädterung weiter zunehmen, vor allem in den Staaten, in denen heute noch vergleichsweise viele Menschen auf dem Land leben. Um 2050 dürften zwei von drei Erdbewohnern Städter sein.

Das ist gleich in mehrfacher Hinsicht von Bedeutung, wenn es um Fragen des Klimawandels geht. So tragen Städte stärker zur globalen Erwärmung bei als ländliche Regionen; denn sie benötigen wegen der hohen Bevölkerungs- und Verkehrsdichte weitaus mehr Energie und Rohstoffe pro Hektar. Deren Gewinnung, Bereitstellung und Verbrauch bringt beträchtliche Emissionen an Treibhausgasen und Schadstoffen mit sich. Diese fallen zwar nicht immer in den Städten selbst an. Dennoch ist die Luftbelastung dort höher als auf dem Land.

Städte tragen aber nicht nur überproportional zum Klimawandel bei, sondern erzeugen durch ihre von Menschenhand überformten Oberflächenstrukturen – Gebäude unterschiedlichster Höhe und Dichte, Industrieanlagen, Straßen, Parks, Wiesen, künstliche Gewässer – auch ein eigenes, lokales Klima, das so genannte Stadtklima. So liegen die Temperaturen abends und nachts über denen im Umland. Zwar ist es zwischen den Häuserzeilen weniger windig, doch treten dafür stärkere Böen auf, und die Schadstoffbelastung der Luft ist höher. Auch die Strahlungs- und Beleuchtungsverhältnisse unterscheiden sich von denen auf dem Land – ebenso die Niederschlagsmuster. Deshalb untersuchen Klimaforscher, wie sich die für die nächsten Jahrzehnte erwartete Erderwärmung speziell auf Städte auswirken wird. Immerhin lebt dort, wie eingangs erwähnt, schon heute die Mehrheit der Bevölkerung – mit steigender Tendenz – auf engstem Raum beieinander und ist damit direkt betroffen.

Unter Klima verstehen Meteorologen das typische Wetter. Damit sind nicht nur die Mittelwerte von Messgrößen wie Temperatur, Niederschlag und Windgeschwindigkeiten gemeint, sondern auch die Abweichungen davon, also die gesamte statistische Verteilung einzelner meteorologischer Parameter. Der Beobachtungszeitraum beträgt mindestens 30 Jahre; denn er muss groß genug sein, dass kurzzeitige zufällige Schwankungen die Verteilungsfunktionen nicht mehr wesentlich verändern. Länger andauernde Abweichungen vom typischen Wetter deuten dann auf eine Klimaänderung hin.

Aus meteorologischer Sicht sind vor allem direkt am Boden gemessene Daten wie Windgeschwindigkeit und -richtung, Temperatur, Niederschlagsmenge und Luftfeuchte von Interesse. Aber auch abgeleitete Größen wie die Dauer von Trockenperioden oder Kältewellen spielen eine Rolle. Bei allen Betrachtungen stehen die statistische Verteilung der Klimaparameter und deren Änderung im Vordergrund.

Wenn von der Erderwärmung die Rede ist, geht es meist um die globale Mitteltemperatur. Was die einzelnen Menschen unmittelbar betrifft, sind aber die regionalen Klimaänderungen. Diese können ganz anders – und deutlich extremer – ausfallen (siehe den Beitrag »Wie hart trifft es Deutschland?«, S. 19). Das regionale Klima für eine Stadt hängt von ihrer geografischen Lage ab und wird durch die topogra-

AUF EINEN BLICK

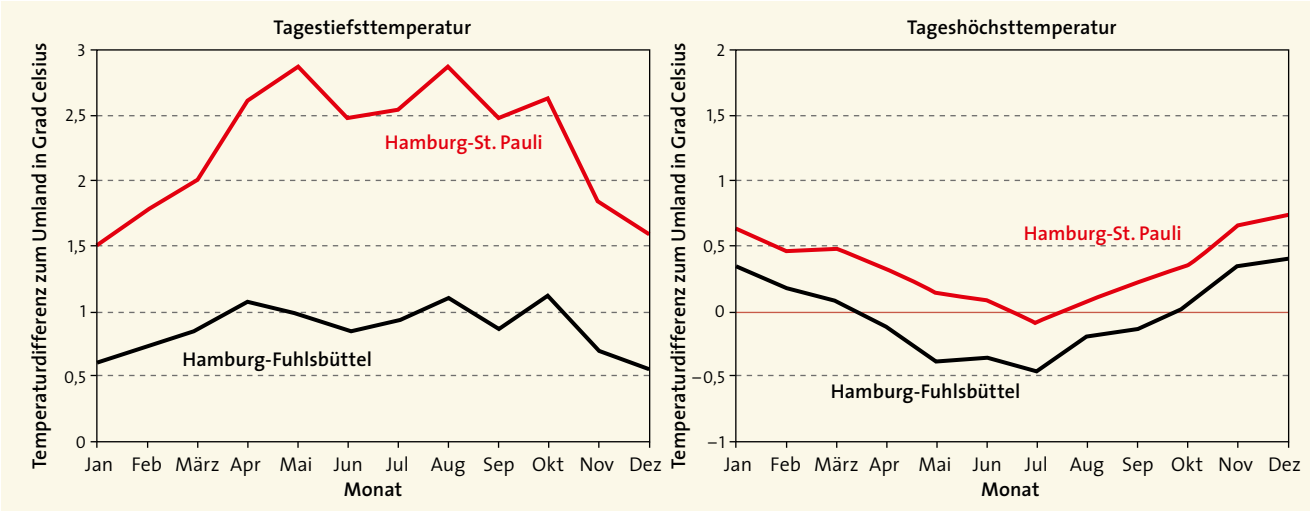
STADTENTWICKLUNG IN ZEITEN DES KLIMAWANDELS

1 Durch ihre **Oberflächenstrukturen** tragen Städte mehr zur **Erderwärmung** bei als ländliche Regionen. Hier werden auch mehr Menschen davon betroffen sein.

2 Schon heute sind Städte **Wärmeinseln**, deren Temperatur teils deutlich über denen des Umlands liegt. Wegen der hohen Emissionen und weil die dichte Bebauung die Durchmischung der Luftmassen erschwert, ist auch die **Schadstoffbelastung** höher.

3 Erste Untersuchungen und Simulationen zeigen, dass der **allgemeine Temperaturanstieg** auch die Städte voll erfassen dürfte, so dass es dort noch erheblich wärmer sein wird.

4 Da Gebäude im Durchschnitt erst nach etwa 50 Jahren grundlegend saniert oder abgerissen werden, sollten Städteplaner schon jetzt die künftigen Klimabedingungen berücksichtigen – etwa durch bessere **Wärmedämmung**, **Begrünung von Dächern** und das Zurückhalten von Regenwasser auf **Sickerflächen**.



In unseren Breiten wirken Städte als Wärmeinseln. Die Tagestiefsttemperaturen (links) liegen dort ganzjährig über denen im Umland. Bei den Höchsttemperaturen (rechts) gilt das zumindest für den Winter. Je dichter die Bebauung, desto größer ist der Temperaturunterschied zum grünen Umland. Das zeigt der Vergleich zwischen den Hamburger Stadtteilen St. Pauli und Fuhlsbüttel.

fischen Verhältnisse oder auch durch Wasserflächen beeinflusst. So strömt bei bestimmten Wetterlagen kühle Luft vom Schwarzwald durch das Höllental nach Freiburg. Ein anderes Beispiel ist der Föhn in München, ausgelöst durch Fallwinde am Nordrand der Alpen. Küstenstädte wiederum profitieren im Sommer von kalter Seeluft, die der nachmittäglichen Hitze entgegenwirkt.

Unterschiede zum Umland

Städte schaffen sich ihr Klima aber auch bis zu einem gewissen Grad selbst: Temperatur, Druck, Luftfeuchte und Windverhältnisse unterscheiden sich in ihrem Wert und ihrer Heterogenität vom Umland. All das sind nicht nur kurzzeitige Abweichungen, sondern langfristige lokale Besonderheiten, welche die Witterungsverhältnisse über weit mehr als 30 Jahre prägen. So wird im einfachsten Fall die Nordseite eines Gebäudes in unseren Breiten fast nie direkt von der Sonne beschienen, was sich etwa auf die Temperatur und Bodenfeuchtigkeit im Gebäudeschatten auswirkt.

Der Begriff Stadtklima bezieht sich in erster Linie auf Parameter, die für den Menschen von unmittelbarer Bedeutung sind. Das gilt zunächst einmal für klassische meteorologische Messgrößen. So beeinflusst die Temperatur unser Wärmeempfinden. Die Luftfeuchte bestimmt über Schwüle oder Trockenheit. Starke böige Winde können unser Wohlbefinden empfindlich stören. Und ob es regnet, bedeckt ist oder die Sonne scheint, wirkt sich merklich auf unsere Stimmung aus. Der Begriff Stadtklima umfasst aber auch weitere Parameter, welche die Gesundheit beeinträchtigen können – beispielsweise die Konzentrationen von Schadstoffen wie Stickoxiden, Ozon oder Feinstaub.

Wie Meteorologen schon seit Langem wissen, sind Städte in unseren Breiten nächtliche Wärmeinseln, deren Durchschnittstemperatur die im Umland übersteigt. Das liegt vor allem an ihrer künstlichen Oberflächenstruktur aus dichten Ansammlungen von Gebäuden mit geteerten Straßen dazwischen. Generell nimmt der Erdboden tagsüber, wenn die Lufttemperatur hoch ist und die Sonne ihn eventuell zusätzlich aufheizt, Wärme auf und gibt sie nachts wieder ab. Das dämpft den Tagesgang der Temperatur. In der Stadt verstärken die versiegelten und mit Beton, Stein oder anderen dichten Materialen bedeckten Oberflächen diesen Effekt; denn sie absorbieren an heißen Sommertagen viel mehr Wärme und speichern sie wirksamer als naturbelassene Böden. Dadurch wirken sie am frühen Abend und in der ersten Nachthälfte wie riesige Heizöfen, welche die Abkühlung verlangsamen.

Hinzu kommt, dass in bebauten Bereichen auch die Luftzirkulation und die langwellige Ausstrahlung behindert ist. Dadurch dauert die Überwärmung unter Umständen bis in die späten Nachtstunden an. Die Minimaltemperaturen liegen deshalb erheblich über denen im Umland (Grafik oben). Die Maximaltemperaturen können wegen der Wärmeaufnahme durch die dichte Bebauung dagegen etwas geringer sein als in der ländlichen Umgebung. Obwohl viele Städte im Hochsommer deswegen tagsüber schwache Kälteinseln sind, übertrifft ihre über 24 Stunden gemessene Durchschnittstemperatur die auf dem Land.

Im Winter, wenn die Sonne wenig Wärme spendet, sorgt ein weiterer Eingriff des Menschen in die Energiebilanz der Oberflächen dafür, dass es in der Stadt nicht nur nachts, sondern auch tagsüber wärmer ist als außerhalb: Die Energieverluste von Gebäuden, Industrieanlagen und Verkehr heizen die umgebende Luft auf. Diese Wärmeabgabe liegt nachts bei etwa 5 bis 10 Watt pro Quadratmeter und kann tagsüber 100 Watt pro Quadratmeter erreichen. Im Einzelfall sind noch weitaus höhere Werte möglich. So haben Wissenschaftler um

Toshiaki Ichinose vom japanischen Nationalinstitut für Umweltstudien in Tsukuba für die Innenstadt von Tokio Ende der 1990er Jahre eine Wärmeabgabe von 1590 Watt pro Quadratmeter ermittelt – mehr als das, was an Sonnenenergie von außen auf die Atmosphäre trifft.

Je dichter die Bebauung, desto ausgeprägter ist der Wärmeinseleffekt. Beispiel Hamburg: Hier registrieren die Messstationen in St. Pauli im Sommer sehr viel höhere Werte als im üppig begrünten Umland; im weniger dicht bebauten Stadtteil Fuhlsbüttel ist der Unterschied dagegen deutlich geringer.

Wie stark eine Stadt als Wärmeinsel wirkt, hängt annähernd logarithmisch von der Zahl der Einwohner ab (Bild unten). Allerdings spielen auch regionalklimatische Faktoren eine Rolle. Unter anderem fällt die Überwärmung umso geringer aus, je höher die Windgeschwindigkeit, der Bedeckungsgrad des Himmels und die Luftfeuchte sind. Würden sich durch den Klimawandel diese Faktoren ändern, könnte sich also selbst bei gleicher Energienutzung und Stadtstruktur der Wärmeinseleffekt verstärken oder abschwächen. Für das meistverwendete A1B-Szenario des UN-Klimarats (siehe den Beitrag auf S. 19) haben Peter Hoffmann, Oliver Krüger und ich mit einem statistischen Modell allerdings gezeigt, dass sich die Überwärmung in Städten im Mittel kaum ändern dürfte. Zu einem ähnlichen Resultat gelangten Barbara Früh, Meinolf Koßmann und Marita Roos vom Deutschen Wetterdienst für Frankfurt (Main).

Das bedeutet aber auch, dass die auf uns zukommende Erwärmung voll auf die städtischen Wärmeinseln durchschlagen wird. Gemäß dem A1B-Szenario steigt die mittlere Lufttemperatur in Deutschland bis Ende des Jahrhunderts im Winter um etwa 2,5 bis 4 und im Sommer um 2 bis 3 Grad Celsius. Das gilt für ländliche wie städtische Gebiete gleichermaßen: Überall wird es mehr Sommertage und heiße Tage (mit einer Höchsttemperatur von mindestens 25 beziehungsweise 30 Grad Celsius) sowie mehr Tropennächte geben (in denen die Temperatur über 20 Grad bleibt). Ihre Zahl erhöht sich – wie bisher schon – in den Städten durch den Wärmeinseleffekt entsprechend, etwa in Frankfurt um zehn Sommertage.

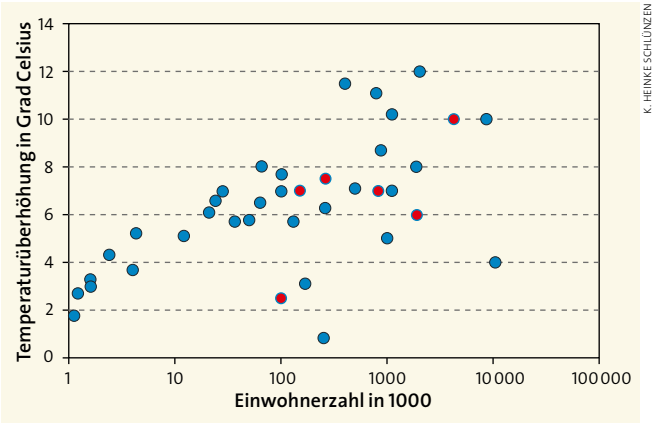
Dem lässt sich nur durch Umbaumaßnahmen begegnen. Eine solche Anpassung erscheint umso sinnvoller und dringender, als Gebäude typischerweise ein halbes Jahrhundert bis zur nächsten grundlegenden Sanierung oder ihrem Abriss bestehen bleiben. Alle heutigen Maßnahmen haben mithin sehr langfristige Auswirkungen. Eine bessere Wärmedämmung spart also nicht nur Energie, sondern zahlt sich auch als vorbeugende Maßnahme für das zukünftige Stadtklima aus.

Für vorausschauende Anpassungsmaßnahmen beim Städtebau lassen sich einige einfache Grundregeln formulieren. Generell empfiehlt es sich, die natürlichen Bodeneigenschaften weitestgehend zu bewahren – das heißt möglichst wenig Fläche zu versiegeln, ein Maximum an Regenwasser in der Stadt zurückzuhalten und das Grün gleichmäßig zu verteilen. Wie sich diese allgemeinen Ratschläge am besten umsetzen lassen, ist weniger klar. So gibt es noch keine gesicherten Erkenntnisse darüber, wie hoch Gebäude maximal sein und welchen Abstand sie voneinander haben sollten. Einiges ist immerhin bekannt. Untersuchungen haben übereinstimmend ergeben, dass der Einfluss einer Grünfläche allenfalls wenige 100 Meter weit reicht. Deshalb sollte eine Stadt nicht nur einzelne isolierte Parks enthalten, sondern durchweg begrünt sein. Bäume am Straßenrand sind ein Anfang. Allerdings dürfen sie nicht die Durchlüftung behindern, wodurch sich Schadstoffe anreichern würden. Ein anderes Mittel, um die Stadt nachts zu kühlen, ist die Begrünung von Dächern. In diesem Fall muss jedoch für ausreichende Bewässerung gesorgt sein, damit die Pflanzen keinen Trockenstress erleiden, der die positiven Effekte zunichtemachen würde.

Wohin mit dem Regenwasser?

Die meisten Menschen mögen keinen Regen, aber Stadtbewohner hegen meist eine besonders große Abneigung dagegen. Ein Grund dafür sind die böigen Winde in den Straßenschluchten, die den Umgang mit Regenschirmen zum Abenteuer machen können. Hinzu kommt die Gefahr der Überflutung von Gehwegen, Straßen und Kellern, vor allem als Folge von Extremniederschlägen. Um das zu verhindern, versuchen die Städte Regenwasser möglichst umgehend in Siele zu leiten. Dadurch geht aber potenzielles Grundwasser verloren, das der städtischen Vegetation fehlen wird, wenn im Zuge des Klimawandels im Sommer vermehrt Hitze- und Trockenperioden auftreten, wie regionale Klimamodelle vermuten lassen. Inzwischen sind viele Städte deshalb dazu übergegangen, Niederschlagswasser zumindest teilweise zurückzuhalten, zum Beispiel über eine Dachbegrünung oder Parkplätze mit Rasengittersteinen (Bild rechts oben). Eine gesteigerte Verdunstung durch die Vegetation sollte kühlend wirken, so dass sich der Wärmeinseleffekt abschwächt.

Von regionalen Änderungen des Niederschlags als Folge der Erderwärmung sind Stadt und Land gleichermaßen be-



K. HEINKE SCHLÜNZEN

Der Wärmeinseleffekt einer Stadt nimmt annähernd logarithmisch mit ihrer Einwohnerzahl zu. Die Werte für die Temperaturüberhöhung in der Grafik sind nicht ganz einheitlich: Meist handelt es sich um Höchsttemperaturen, in wenigen Fällen um Jahresmittel. Städte in Deutschland sind rot markiert.

K. HEINKE SCHLÜNZEN

Parkplätze mit Rasengittersteinen können Niederschläge aufnehmen. Weil durch die Vegetation mehr Wasser verdunstet, schwächen sie zudem den Wärmeinseleffekt von Städten ab.

troffen. Heutige Starkniederschlagsmengen werden nach dem A1B-Szenario in Deutschland bis Ende des Jahrhunderts vermutlich um etwa zehn Prozent häufiger auftreten. Das sollte bei der Planung von Sielen und Sickerflächen bedacht werden. Zu berücksichtigen ist auch, dass Städte die Niederschlagsverteilung beeinflussen. Auf der windzugewandten Seite zwingen sie nämlich die Luft zum Aufsteigen. Das verstärkt die Wolkenbildung und erhöht die Niederschlagsneigung auf der windabgewandten Seite.

Diesen Effekt haben Forscher schon bei verschiedenen Städten nachgewiesen. Ob der Niederschlag im Stadtinneren bereits zunimmt oder erst außerhalb, hängt von den lokalen topografischen Gegebenheiten und der aktuellen meteorologischen Situation ab. Aber auch die Stadtgröße spielt eine Rolle. Je ausgedehnter eine Stadt ist, desto mehr von dem leeseitig erhöhten Niederschlag fällt in ihr selbst. Das hat mein Mitarbeiter Peter Hoffmann 2009 in einer idealisierten Studie gezeigt. In Hamburg tritt nach Untersuchungen meiner Gruppe bei fast allen Windrichtungen verstärkter Lee-Niederschlag auf. Eine Ausnahme bilden nur Nordostwinde – vermutlich wegen topografischer Effekte.

Auf Grund ihrer Schadstoffemissionen können Städte aber auch für weniger Niederschläge sorgen. Insbesondere Schwefel- und Stickoxide sowie Ammoniak bilden in der Luft Aerosole. Diese Schwebteilchen wirken als Kondensationskeime für Wassertröpfchen. Da ihre Konzentration über dem Stadtgebiet hoch ist, entstehen viele solche Tröpfchen, die um den vorhandenen Wasserdampf konkurrieren. Deshalb bleiben sie klein und zu leicht, um zu Boden zu fallen. Durch die Aerosole intensiviert sich also zwar die Wolkenbildung, aber es regnet in den leeseitigen Bereichen einer Stadt weniger.

Wir haben es folglich mit zwei gegensätzlichen Effekten zu tun. Während eine Stadt durch ihre Topografie die Niederschläge in leeseitigen Gebieten verstärkt, schwächt sie sie wegen ihrer Emissionen zugleich ab. Welcher Vorgang überwiegt, muss in jedem Fall einzeln untersucht werden. Für die Zukunft ist damit zu rechnen, dass der vom Menschen verursachte Schadstoffausstoß weiter zurückgeht. Damit verringert sich der Abschwächungseffekt, und die leeseitigen Niederschläge sollten zunehmen. Durch die globale Erwärmung ändern sich allerdings möglicherweise auch die Windstärken und -richtungen – und damit die Stadtteile, die im Windschatten liegen. Auskunft darüber können Simulationen mit regionalen Klimamodellen geben.

Obwohl schon seit Langem bekannt ist, dass Städte ein eigenes Klima aufweisen, bleibt noch viel zu erforschen. Dabei gilt es, die eher qualitativen Aussagen mit konkreten Zahlen zu unterfüttern, die Beobachtungen zu quantifizieren und die Schlussfolgerungen statistisch abzusichern. Städte sind von Menschen gemacht, und die Art ihrer Bebauung und Strukturierung ist es, die das Regionalklima derart modifiziert, dass es zum kleinräumigen heterogenen Stadtklima wird. Deshalb besteht grundsätzlich die Möglichkeit zum Eingreifen und zur Verbesserung der gegenwärtigen Situation. Gebäude werden regelmäßig saniert oder sogar ersetzt. Die Umstrukturierung von Städten mit dem Ziel, das lokale Klima angenehmer zu gestalten, ist daher nicht zwangsläufig mit hohen Kosten verbunden. Zugleich kann sie negativen Auswirkungen der Erderwärmung beizeiten vorbeugen.

DIE AUTORIN

KLIMACAMPUS, UHH / FOTO: D. AUSSERHOFER

K. Heinke Schlünzen ist Professorin für Meteorologie an der Universität Hamburg. Als Leiterin der Arbeitsgruppe »Meso- und mikroskalige Vorgänge und Phänomene« forscht sie über kleinräumige Vorgänge in der Atmosphäre.

QUELLEN

Allen, L. et al.: Global to City Scale Urban Anthropogenic Heat Flux: Model and Variability. In: International Journal of Climatology 31, S. 1990–2005, 15.11. 2011

Früh, B. et al.: Frankfurt am Main im Klimawandel – Eine Untersuchung zur städtischen Wärmebelastung. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 237, Offenbach 2011

Hoffmann, P.: Modifikation von Starkniederschlägen durch urbane Gebiete. Diplomarbeit Meteorologie, Universität Hamburg 2009

Hoffmann, P. et al.: A Statistical Model for the Urban Heat Island and its Application to a Climate Change Scenario. In: International Journal of Climatology, in Druck. doi: 10.1002/joc.2348

Rudolf, E.: Untersuchung von Starkniederschlägen der ENSEMBLES Regionalmodelle in der Metropolregion Hamburg. Bachelorarbeit Meteorologie, Universität Hamburg 2011

Schlünzen, K.H. et al.: Long-Term Changes and Regional Differences in Temperature and Precipitation in the Metropolitan Area of Hamburg. In: International Journal of Climatology 30, S. 1121–1136, 30.6. 2010

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1142728**

So haben Sie Wissenschaft noch nie gesehen …

Superschnell dank Haifischhaut?

Ingenieur Björn Feldhaus will Flugzeuge Treibstoff sparend bauen – indem er die Struktur von Haifischhaut auf Triebwerksschaufeln nachbildet.

www.sciencemovies.de

science movies

Acht spannende Forschungsprojekte der VolkswagenStiftung als Videoblog

Spektrum DER WISSENSCHAFT

ERDE 3.0

Wasserstoff – der Energieträger für die Zukunft

MAI 2012

5/12 Spektrum DER WISSENSCHAFT

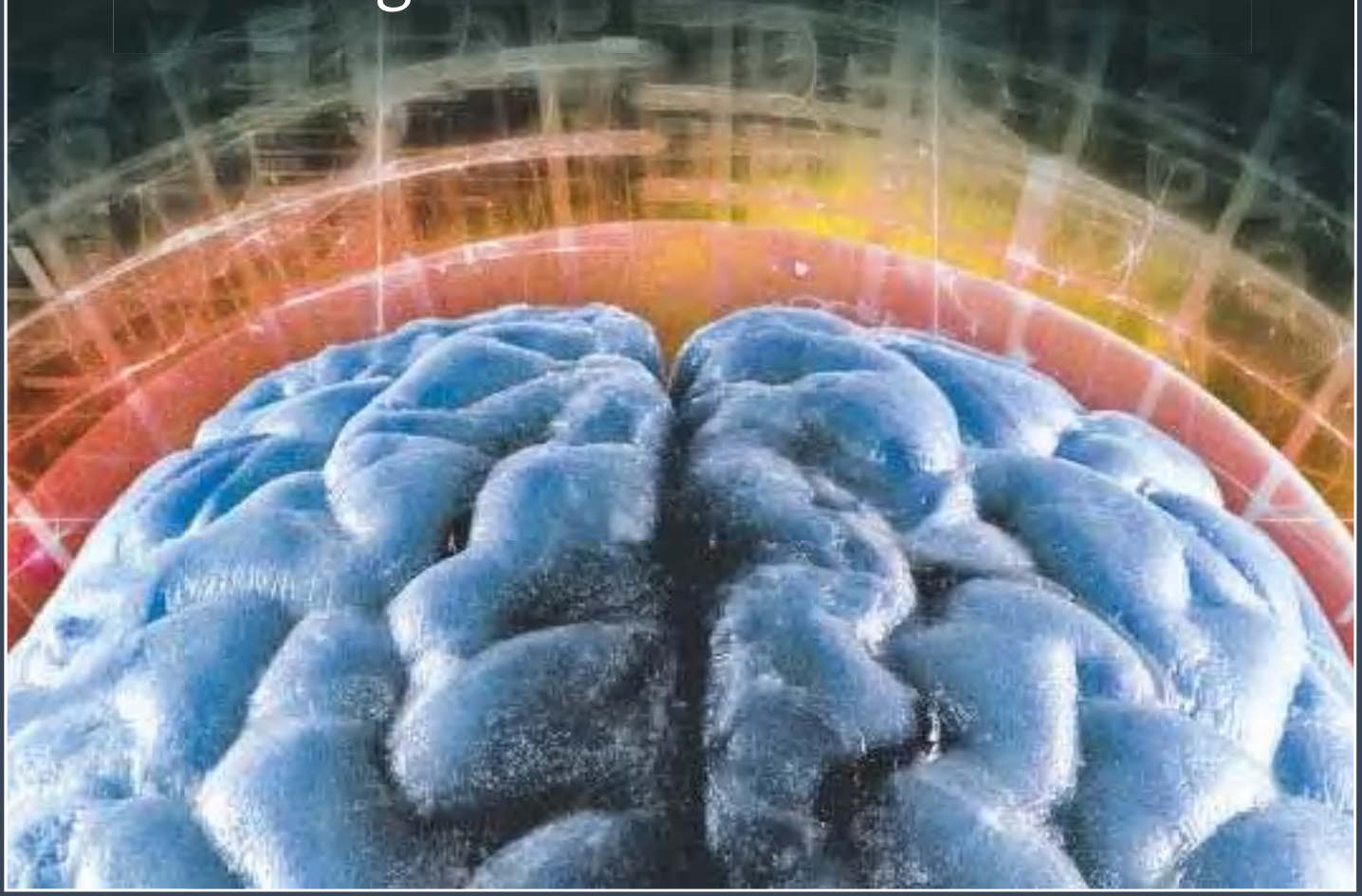
ASTRONOMIE
Dunkle Materie in der Milchstraße

ARCHÄOLOGIE
Die Megalithen Sumatras

MEDIZIN
Mit Gentherapie gegen Aids

Die Grenzen der Intelligenz

Wie klug können wir noch werden?



DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

www.spektrum.de

Unsere Neuerscheinungen

Spektrum Spezial – Biologie, Mensch, Kultur 2/2012

DIE GRÖSSTEN RÄTSEL DER PHILOSOPHIE

Was ist der Mensch? Hat er einen freien Willen? Wie entsteht Bewusstsein? Was können wir überhaupt wissen? Was ist Gerechtigkeit? Viele der großen Fragen der Menschheit haben Philosophen schon in der Antike aufgeworfen und in jeder Epoche neu gestellt. Doch in einer Welt, die immer komplexer wird und sich rascher verändert als je zuvor, gehen den Philosophen die Fragen nicht aus. Und immer neue kommen hinzu, etwa die nach ethischen Grenzen des technischen Fortschritts. In diesem **Spektrum-Spezial** legen namhafte Philosophen dar, welche Rolle ihre Disziplin in unserer modernen Zeit spielt und was sie heute zu den größten Rätseln der Menschheit zu sagen hat. Dabei zeigt sich, wie spannend das Nachdenken über die Welt immer noch ist.

Das Spezial »Die größten Rätsel der Philosophie« kostet € 8,90 zzgl. Versand. Die Spezial-Reihen können auch unter www.spektrum.de/spezialabo bezogen werden.

Gehirn&Geist-Basiswissen 5

»DIE VERMESSUNG DER SEELE«

Psychologie und Hirnforschung sind Wissenschaften mit kurzer Geschichte, aber langer Vergangenheit. In diesem Sonderheit, dem fünften Teil unserer Serie **Basiswissen**, präsentieren wir die besten **G&G**-Beiträge über Pionierleistungen aus fünf Jahrhunderten: Begleiten Sie Künstler, Gelehrte und Forscher bei ihren Erkundungen des menschlichen Geistes. Themen der Ausgabe sind unter anderem:

> Innenansichten des Seelenorgans
> »Das Gehirn ist ein Irrweg«
> Einblicke in die Dynamik des Denkens
> Hirnforschung und Psychologie – eine schwierige Beziehung

Das neue Basiswissen kostet € 8,90 zzgl. Versand.
Alle Hefte der Reihe können auch unter www.gehirn-und-geist.de/basiswissen bezogen werden.

STERNE UND WELTRAUM 5/2012

Sterne und Weltraum bietet monatlich eine umfassende Weltraumperspektive für alle, die von der kosmischen Umgebung unserer Erde fasziniert sind. Experten ihres Fachs beschreiben für Sie das spannende Geschehen im Weltall. Themen der aktuellen Ausgabe sind:

>> Kosmischer Staub: Seine Schlüsselrolle im Kreislauf der Materie
>> Weltweites Netz: Auf der Suche nach Gravitationswellen
>> Supernova in M101: Wie kam es zur großen Sternexplosion
>> Kleinplaneten: Amateure und Profis forschen gemeinsam
>> Weltall im Computer: Virtuelle Raumflüge mit Redshift 3D

Sterne und Weltraum kostet € 7,90 als Einzelheft und ist auch im Abonnement (12 Ausgaben pro Jahr) für € 85,20 inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 64,–) zu beziehen.

GEHIRN&GEIST 5/2012

Zehnmal pro Jahr erwarten Sie in **G&G** spannende Berichte aus folgenden Themengebieten: Psychologie, Hirnforschung, Medizin, Psychiatrie, Psychotherapie, Philosophie, Pädagogik, Religion, Neurotheorie und künstliche Intelligenz. Themen der aktuellen Ausgabe sind:

>> Ernärung und Psyche: Essen, das die Seele schützt
>> Hirnforschung: Täterprofile im Hirnscan
>> **Spezial Alzheimer**: Die Krankheit des Vergessens
>> Die Qual der Wahl: Weniger ist mehr

Gehirn&Geist kostet € 7,90 als Einzelheft und ist auch im Abonnement (10 Ausgaben pro Jahr) für € 68,– inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 55,–) zu beziehen.

Alle Hefte sind im Handel erhältlich oder unter:

Spektrum DER WISSENSCHAFT
WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

online: spektrum.de/lesershop
E-Mail: service@spektrum.com
Tel.: +49 6221 9126-743

Fax: +49 6221 9126-751
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg

Hartwig Hanser
Redaktionsleiter
hanser@spektrum.com

Intelligenz – Spielball der Evolution?

In den 1980er Jahren machte der Politologe James R. Flynn eine interessante Beobachtung: Die Ergebnisse von Intelligenztests hatten sich in den Industrieländern während der vorherigen Jahrzehnte stetig verbessert. Je nach Testform und Land nahmen die IQ-Werte von Generation zu Generation um 5 bis 25 Punkte zu. Werden wir also immer schlauer?

Die Biologie macht uns da eher wenig Hoffnung: Die Evolution des menschlichen Denkorgans könnte bereits an ihrem Ende angelangt sein; einer weiteren Optimierung stehen laut Studien unüberwindbare physikalische Gesetze entgegen (siehe Artikel ab S. 26).

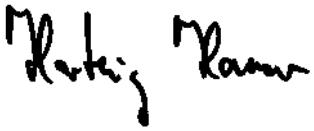
Kaum war der Flynn-Effekt richtig bekannt geworden, stießen Forscher auch schon auf einen gegenläufigen Trend in manchen Industrieländern. Der durchschnittliche IQ scheint dort einigen Untersuchungen zufolge in den 1990er Jahren einen Höchststand erreicht zu haben und fällt seitdem wieder ab! Auch hier streiten die Experten noch über die möglichen Gründe. So diskutieren sie sich verschlechternde Ernährungsgewohnheiten, übermäßigen Konsum elektronischer Medien, die demografische Entwicklung – sowie verstärkte Einwanderung.

Das erinnert an Thilo Sarrazins umstrittene Thesen zur Intelligenzentwicklung in Deutschland, mit denen er 2010 für Aufsehen sorgte. Eine häufig kritisierte Passage seines Buchs »Deutschland schafft sich ab« beschreibt die menschliche Intelligenz als zu 50 bis 80 Prozent erblich. Tatsächlich ist Sarrazins Wortwahl sehr ungenau und damit irreführend. Besser sollte man sagen, dass Variationen des IQ-Werts in der Bevölkerung zu – grob geschätzt – rund zwei Dritteln auf Erbgutabweichungen zwischen Individuen und zu etwa einem Drittel auf unterschiedlichen Entfaltungsbedingungen für die Erbanlagen in der jeweiligen Umwelt beruhen. Vor allem stehen die beiden Aspekte nicht in einem additiven, sondern einem multiplikativen Verhältnis zueinander, wie der Verhaltensbiologe Joachim Bensel im »Lexikon der Biologie« betont: Intelligenz ist nicht die Summe von Genen und Umwelt, sondern ihr Produkt.

Letztlich wollen jedoch beide Formulierungen auf dasselbe hinaus: Wie leistungsfähig ein Gehirn ist, hängt mindestens so sehr von biologischen wie von Umweltfaktoren ab, vielleicht sogar wesentlich mehr. Da nun aber anscheinend von der Evolution kaum weitere Verbesserungen zu erwarten sind – und diese ohnehin nur über lange Zeiträume zum Tragen kämen –, bleiben lediglich die nichtbiologischen Grundlagen der Intelligenzausprägung als Ansatzpunkt, um unsere Denkfähigkeit zu erhöhen.

Glücklicherweise besteht hier noch einiges Entwicklungspotenzial. Denn laut verschiedenen Studien hängen IQ-Unterschiede in so genannten bildungsfernen Kreisen viel stärker von Umweltbedingungen ab als bei privilegierteren Mitgliedern der Gesellschaft wie typischen Akademikern. Damit schließt sich der Kreis zum Flynn-Effekt: Wir müssen schlicht die Umweltbedingungen so verbessern, dass jeder das ihm in Form von Erbfaktoren in die Wiege gelegte Intelligenzpotenzial möglichst weit gehend realisieren kann. Hier ist die Politik gefordert, diese Chance vor allem jenen zu geben, die davon am meisten profitieren könnten!

Herzlich Ihr



AUTOREN IN DIESEM HEFT

Carl H. June (links) und **Bruce L. Levine** von der University of Pennsylvania in Philadelphia wollen mit einem neuen gentechnischen Ansatz dem Aidserreger HIV ein Schnippchen schlagen (ab S. 34).

Warum ist die Milchstraße verbogen? Der Astronom **Leo Blitz** von der University of California in Berkeley führt das auf Schwerkrafteffekte der Dunklen Materie zurück (ab S. 42).

Seit 2003 leitet **Dominik Bonatz** von der Freien Universität Berlin Ausgrabungen auf Sumatra. Der Professor für Vorderasiatische Archäologie beschreibt ab S. 58 die engen Verflechtungen zweier scheinbar getrennter Kulturen in unterschiedlichen geografischen Regionen der Tropeninsel.

BIOLOGIE & MEDIZIN

TITELTHEMA

▸ **26 Die Grenzen des Gehirns**
Douglas Fox
Können wir aus biologischer Sicht noch wesentlich schlauer werden? Experten meinen: Nein! Denn unser Gehirn hat schon alle Möglichkeiten der Optimierung ausgereizt.

▸ **34 Zutritt verboten für HIV**
Carl H. June, Bruce L. Levine
Forscher manipulieren Immunzellen von HIV-Infizierten, um sie genetisch dauerhaft gegen das Aidsvirus resistent zu machen.

PHYSIK & ASTRONOMIE

▸ **42 Die dunkle Seite der Milchstraße**
Leo Blitz
Die Scheibe unserer Galaxis ist leicht verbogen. Ist daran die Dunkle Materie schuld?

SCHLICHTING!

50 Schau nicht so genau hin!
H. Joachim Schlichting
Grob verpixelte Gesichter sind kaum zu erkennen – es sei denn, man vernichtet noch mehr Information.

52 Das Leuchten des Heiligenscheins
H. Moysés Nussenzveig
Für das rätselhafte atmosphärische Phänomen der Glorien ist vor allem der so genannte optische Tunneleffekt verantwortlich.

MENSCH & KULTUR

▸ **58 Megalithen im Regenwald**
Dominik Bonatz
Archaische Steinkolosse im Dschungel des Hochlands, Paläste und Tempelanlagen im Tiefland: Auf Sumatra kooperierten einst zwei Kulturen, wie sie verschiedener nicht sein konnten.

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

66 Wundergarten der Polyeder
Norbert Treitz
Räumliche Körper fügen sich auf überraschende Weise zu großen Strukturen zusammen, etwa zu Zerlegungen des Raums in zwei getrennte Teile, die unendlich groß sind und sich unendlich oft umschlingen.

26
TITELTHEMA

Die Grenzen der Intelligenz

Wie viel klüger können wir noch werden?

ERDE & UMWELT

SERIE: DIE ZUKUNFT DER ENERGIE

ERDE 3.0

▸ **74 Hoffnungs(energie)träger Wasserstoff**
Vincent Artero, Nicolas Guillet, Daniel Fruchart, Marc Fontecave
Wasserstoff könnte viele Probleme der Energieversorgung lösen – sofern die Kosten für Produktion und Speicherung deutlich sinken.

INTERVIEW

82 »Wir wollen die Welt retten«
Der Chemiker Robert Schlögl verrät, warum bessere Katalysatoren der Schlüssel für effektivere Elektrolyseure und Brennstoffzellen sind.

TECHNIK & COMPUTER

▸ **84 Vermehrungsfähige Maschinen**
Jean-Paul Delahaye
Zelluläre Automaten sind sehr einfach gebaut. Gleichwohl können sie wesentliche Mechanismen des Lebens nachbilden, darunter insbesondere die Vermehrung.

Titelmotiv: Gehirn: Adam Voorhes Photography; Hintergrund: iStockphoto / Andrew Ostrovsky [M]; Bearbeitung: Spektrum der Wissenschaft

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▸ gekennzeichnet.

SPEKTROGRAMM

8 Tauwetter auf Grönland • Genetisch veränderter Hartweizen • Orientierung bei Wüstenameisen • Frühe Magnetfelder im All • Mesopotamische Siedlungsgeschichte • Spektroskopie von Antiwasserstoff

BILD DES MONATS

11 Blick auf Merkur

FORSCHUNG AKTUELL

12 Kosmische Raubtierfütterung
Schwarzes Loch verschlingt Gaswolke

14 Revolution der Riesenviren
Eine vierte Domäne des Lebens?

16 Qubits auf der Datenautobahn?
Beugungsgrenze in der Quantenoptik durchbrochen

20 Feinfühlige Spinnen
Beuteortung mittels Vibrationen

KOMMENTAR

21 Neutrinos nicht überlichtschnell
Ein Messfehler mit Folgen

22 Abelpreis für Endre Szemerédi
Kombinatorik und extremale Graphen

SPRINGERS EINWÜRFE

24 Fliegen wie ein Vogel
Roboter können es mittlerweile

WEITERE RUBRIKEN

3 Editorial

6 Leserbriefe/Impressum

92 Rezensionen
M. Laita: WasserFarben
R. Penrose: Zyklen der Zeit
Zahlreiche Werke von H. Lesch et al.
B. Kanitscheider:
Das hedonistische Manifest
A. Fothergill, K. Scholey: Im Reich der Raubkatzen (Film); u. a.

104 Wissenschaft im Rückblick
Vom Telegrafen zum Radioteleskop

105 Exponat des Monats
Der »Flammenwagen« – Raketenmotor mit Flüssigtreibstoff

106 Vorschau

Das letzte Rätsel

Der Physiker Claus Kiefer stellte Ansätze vor, wie Quantenphysik und allgemeine Relativitätstheorie vereint werden können. (»Auf dem Weg zur Quantengravitation«, April 2012, S. 34)

Walter Weiss, Kassel: Der Autor gibt einen Überblick über die immer komplizierter werdenden Theorien zur Lösung dieses »letzten Problems« mit gezwungenermaßen auch immer komplizierter werdenden mathematischen Formeln, die diese Theorien darstellen. Das erweckt jedoch den Eindruck, als habe die Suche nach einer Lösung manische oder zumindest krampfhafte Züge angenommen. Es stellen sich einige Fragen:
1) Handelt es sich womöglich um ein Scheinproblem? Muss eventuell die Divergenz zwischen Quantenphysik und allgemeiner Relativitätstheorie von unserem irdischen Verstand schlicht hingenommen werden (wie etwa die viel weniger gewichtige Divergenz zwischen Korpuskel- und Wellennatur des Lichts)?
2) Ist die Mathematik als bisher stets ausschlaggebendes Instrument bei der Lösung naturwissenschaftlicher Probleme hier an ihre Grenze gestoßen? Die Mathematik kann nie etwas anderes

MPI FÜR GRAVITATIONSPHYSIK / MILDE SCIENCE COMMUNICATIONS

Die Raumzeit könnte sich aus winzigen Raumzeitstücken zusammensetzen – so ein Vorschlag zur Zusammenführung von Quanten- und Relativitätstheorie.

leisten, als die zu definierenden und zu untersuchenden Vorgänge auf unserer mit der Reichweite unserer körperlichen Sinne begrenzten Umwelt abzubilden.
3) Sind die vielen komplizierten Versuche, die der Autor darstellt, vielleicht weniger darauf gerichtet, das »letzte Rätsel« zu lösen – als vielmehr darauf, mit allen Mitteln die Anwendbarkeit der Mathematik auch hier zu verteidigen?

Antwort des Autors Claus Kiefer:
Zu 1): Das Problem ist, dass allgemeine Relativitätstheorie und Quantenphysik nicht gleichzeitig exakt gelten können. Das liegt zum Beispiel an dem unterschiedlichen Zeitbegriff, wie im Artikel ausgeführt. Auch wenn diese Diskrepanz für die Alltagsphysik keine Rolle spielt, steht sie doch einem tieferen Verständnis von Kosmologie und Schwarzen Löchern entgegen.

Zu 2) und 3): Ob man mit der Mathematik an Grenzen stößt, ist ein interessante Frage. Das Problem der Quantengravitation ist trotz aller mathematischen Schwierigkeiten aber in erster Linie ein begriffliches. Ganz sicher geht es nicht um die Rettung der Mathematik auf Kosten der Physik.

Düstere Erfolgsaussichten

Tumoren mittels Impfung bekämpfen – das plant der Biotechnologe Eric von Hofe. (»Immuntherapie gegen Krebs«, März 2012, S. 24)

Rudolf Mierau, Eschweiler: Ein Grund für das Scheitern vieler Versuche zur Krebstherapie mit Hilfe des Immunsystems ist sicherlich, dass der Tumor sich seit seiner Entstehung mit diesem Gegner auseinandergesetzt hat. Er kann trotz des Immunsystems wachsen und sich ausbreiten und sich den T-Lymphozyten entziehen. Der Krebs, dem

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.)
Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser (Monatshefte), Dr. Gerhard Trageser (Sonderhefte)
Redaktion: Thilo Körkel (Online-Koordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Editor-at-Large: Dr. Reinhard Breuer
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Redaktionsassistenz: Anja Albat-Nollau
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114
Verlagsleiter: Richard Zinken
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Rainer Kayser, Dr. Michael Springer, Emmanuelle Vaniet, Dr. Sebastian Vogel, Dr. Klaus Volkert

Leser- und Bestellservice:
Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung:
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 7,90 (D/A) / € 8,50 (L) /sFr. 14,–; im Abonnement € 84,– für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Die Preise beinhalten € 8,40 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 8,40 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e.V. erhalten SdW zum Vorzugspreis.
Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Bereichsleitung Anzeigen: Marianne Dölz; Anzeigenleitung: Marco Buch, Tel. 0211 887-2483, Fax 0211 887 97-2483; verantwortlich für Anzeigen: Christian Herp, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887 2481, Fax 0211 887-2686
Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 33 vom 01.01. 2012.
Gesamtherstellung: L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2012 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
75 Varick Street, New York, NY 10013-1917
Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven Inchcoombe, Vice President, Operations and Administration: Frances Newburg, Vice President, Finance, and Business Development: Michael Florek, Managing Director, Consumer Marketing: Christian Dorbandt, Vice President and Publisher: Bruce Brandfon

Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

der Arzt ja erst zu Leibe rücken kann, wenn er seiner gewahr wird, ist also bereits das erfolgreiche Produkt einer harten Selektion unter dem Druck des Immunsystems. Diese Waffe nun trotzdem erneut einzusetzen, ähnelt dem Versuch, eine bakterielle Infektion mit einem Antibiotikum zu bekämpfen, von dem man schon weiß, dass die Erreger dagegen resistent sind. Die Erfolgsaussichten für den Autor und sein Unternehmen erscheinen deshalb eher düster.

Folgen für die Landwirtschaft

Die Chemikerin Katharine Sanderson schlug vor, aus verholzten Pflanzenresten Biokraftstoff herzustellen. (»Kein Zuckerschlecken«, März 2012, S. 74)

Fabian Cundano Maltez, Erfurt: Solche organischen Reste wie Stängel und Blätter spielen in der Landwirtschaft eine entscheidende Rolle: als direkter Dünger (untergepflügt) oder als indirekter (über den Umweg Tierfutter und Gülle). Daher müsste bei ausgebauter Biokraftstofferzeugung der zweiten Generation (also auch Integrierung von anderweitigem Nutzpflanzenanbau) die Regeneration des Bodens auf sämtlichen landwirtschaftlichen Anbauflächen zu 100 Prozent durch Einsatz künstlicher Dünger erfolgen – und dies bei (durch optimierte Anbaupflanzen) noch deutlich intensivierter Bodenbeanspruchung.

Wirklich zufällig

Mit Zufallszahlen lassen sich Flächeninhalte komplizierter Figuren gut ermitteln, meinte Brian Hayes. (»Spiel mit dem Zufall«, Februar 2012, S. 88)

Andreas Berg, Berlin: In dem Beitrag wird etwas missverständlich formuliert, dass Zufallszahlen nicht wirklich zufällig sind, wenn sie von Computern berechnet werden. Richtig müsste es dagegen heißen, dass durch arithmetische Methoden berechnete Zufallszahlen nicht wirklich zufällig sind. Heutzutage haben Computer vielfältige Möglichkeiten, unvorhersagbare Größen für die Erzeugung von Zufallszahlen heranzuziehen, beispielsweise Wärmesonden, Zeitgeber, Mausbewegungen oder Aktivitäten an den Netzwerkschnittstellen. Diese Möglichkeiten werden in der Praxis (etwa in der Kryptografie) eingesetzt.

Auch das Thema Korrelationen ist etwas komplexer als beschrieben, denn korreliert können nicht nur einzelne, aufeinander folgende Zufallszahlen sein, sondern in beliebig komplexer Weise beliebige Teilmengen der generierten Zufallszahlen. Die Korrelationen können so verdeckt sein, dass in der Praxis eine Beweisführung kaum möglich ist, ob es Korrelation gibt oder nicht – unabhängig davon, ob die Zahlen analog oder digital erzeugt wurden.

Virale DNA in menschlichem Erbgut?

»RNA aus der Nahrung beeinflusst Cholesterinspiegel«, Spektrogramm November 2011, S. 10

Jan Brak, Villach (Österreich): Wenn schon aus Nahrung RNA in unsere Zellen gelangt, sind dann auch Viren in der Lage, ihre Gene in Human-DNA einzuschleusen, und sind diese DNA-Abschnitte vererblich? Von vielen tausenden Menschen ist jetzt das Erbgut schon entschlüsselt. Ist jemals festgestellt worden, ob es darin »fremde« DNA-Abschnitte viraler Herkunft gibt? Könnten dann diese Abschnitte von Bedeutung sein bei der Entstehung von Autoimmunkrankheiten wie Diabetes oder auch von Krebs?

Antwort der Redaktion:
Rund 45 Prozent des menschlichen Erbguts bestehen aus springenden Genen (Transposonen), von denen die meisten jedoch ihre Fähigkeit zum Springen verloren haben. Vermutlich handelt es sich ursprünglich um DNA aus Retroviren, die sich ins menschliche Genom integriert hat und nun vererbt wird. Wenn Transposonen springen, wird eine Kopie ihrer genetischen Information an anderer Stelle wieder in die DNA eingebaut. Je nachdem, wo das geschieht, können unterschiedliche Folgen auftreten: Veränderte oder ausgeschaltete Eiweißmoleküle, die Synthese von wesentlich größeren oder kleineren Mengen eines Proteins und so fort. Im Prinzip kann dadurch auch Krebs entstehen.

Erratum
»Auf der Suche nach ›grünem‹ Benzin«, März 2012, S. 78
Auf S. 78, 2. Spalte, 1. Zeile werden Substanzen, die sich aus Zuckerrohr und Maiskörnern gewinnen lassen, Kohlenwasserstoffe genannt. Es muss richtig Kohlenhydrate heißen.

FOLGEN SIE UNS IM INTERNET

facebook
www.spektrum.de/facebook

YouTube
www.spektrum.de/youtube

studiVZ
www.spektrum.de/studivz

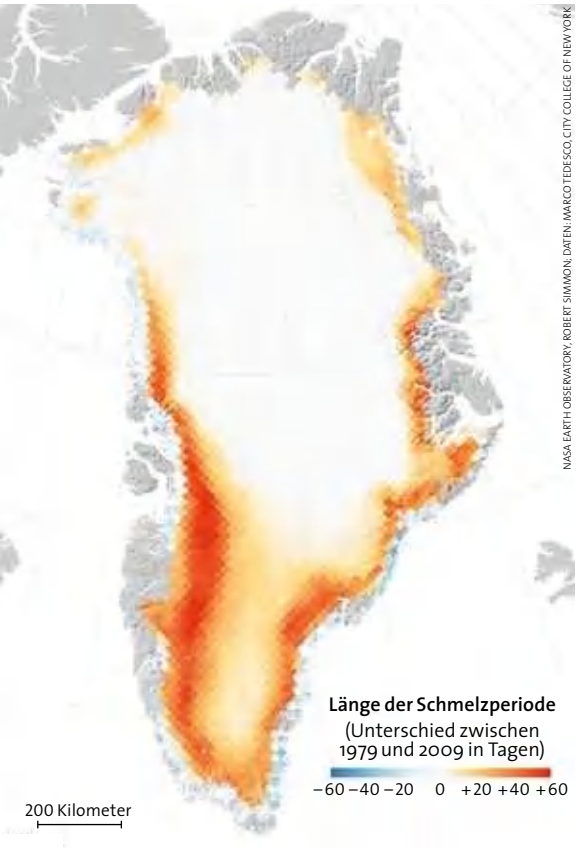
twitter
www.spektrum.de/twitter

BRIEFE AN DIE REDAKTION

... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf www.spektrum.de/leserbriefe oder schreiben Sie mit Ihrer kompletten Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Leserbriefe
Sigrid Spies
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

Die vollständigen Leserbriefe und Antworten der Autoren finden Sie ebenfalls unter: www.spektrum.de/leserbriefe



NASA EARTH OBSERVATORY, ROBERT SIMMON; DATEN: MARCO TEDESCO, CITY COLLEGE OF NEW YORK

In großen Teilen Grönlands hält das Tauwetter heute länger an als früher.

KLIMAWANDEL

Mehr Tauwetter auf Grönland

Grönlands Eisschild reagiert womöglich deutlich empfindlicher auf den Klimawandel als bislang angenommen, befürchten Forscher um Alexander Robinson von der Universidad Complutense de Madrid (Spanien). Gemäß ihrer neuen Modellrechnung könnten die grönländischen Gletscher bereits komplett verschwinden, wenn die globale Durchschnittstemperatur um lediglich 1,6 Grad Celsius steigt, verglichen mit dem vorindustriellen Niveau. Nach den bisher zuverlässigsten Schätzungen wäre erst ab einer mittleren Erwärmung um 3,1 Grad Celsius mit einem Totalverlust des Eispanzers zu rechnen.

Falls die globale Durchschnittstemperatur den Schwellenwert nur wenig übersteige, würde sich das Schmelzen zwar über zehntausende Jahre hinziehen, schreiben die Forscher. Setze sich der gegenwärtige Trend beim Ausstoß klimarelevanter Treibhausgase allerdings fort, so beschleunige sich der Eisverlust stark. Würde die regionale Durchschnittstemperatur auf Grönland etwa um acht Grad Celsius zunehmen – was den Modellen zufolge im Bereich des Möglichen liegt –, verschwände innerhalb der nächsten 500 Jahre ein Fünftel des Eises. Weit gehend eisfrei wäre die Insel dann in 2000 Jahren, wie Robinson und sein Team ermittelt haben.

2011 war der Grönländische Eisschild, das zweitgrößte dauerhaft vereiste Areal der Welt, während des Sommers auf einem knappen Drittel seiner Fläche geschmolzen – zum dritten Mal seit Beginn der Aufzeichnungen in den 1970er Jahren. In vielen Regionen der Insel dauert die jährliche Schmelzperiode mittlerweile mehrere Wochen länger als noch vor einigen Jahrzehnten.

Nature Climate Change
10.1038/nclimate1449, 2012

BIOTECHNOLOGIE

Genetisch veränderter Hartweizen trotzt Salzböden

Hartweizen *(Triticum durum)* ist ein wichtiges Grundnahrungsmittel: Er dient etwa als Basis für Pasta, Couscous und Bulgur. Auf salzigen Äckern gedeiht er allerdings schlecht – im Gegensatz zum Weichweizen *(Triticum aestivum)*, aus dem Brotmehl hergestellt wird. Der Unterschied rührt daher, dass Hartweizen während mehrtausendjähriger Züchtung seine ursprünglich vorhandene Salztoleranz verloren hat. Allerdings kann ihm die Salzverträglichkeit wieder beigebracht werden, melden nun australische Wissenschaftler.

Die Forscher um Matthew Munns von der University of Western Australia kreuzten Erbmaterial des Einkorns (*Triticum monococcum*, eine der ältesten domestizierten Getreidearten) in Hartweizen ein, und zwar das Gen *TmHKT1;5-A*. Es enthält die Bauanleitung für einen Ionentransporter, der in bestimmten Zellen des Wasserleitungssystems in den Wurzeln sitzt. Der Transporter pumpt Natriumionen aus dem Wasser, das nach oben in die Pflanze geleitet wird, und schützt die Blätter so vor toxischen Natriumkonzentrationen. Der damit ausgerüstete Hartweizen erbrachte in Feldversuchen auf salzigen Böden um fast ein Viertel höhere Erträge.

CSIRO

Ein Versuchsfeld im Norden des australischen Bundesstaats New South Wales: Hier wächst die neu gezüchtete Form des salztoleranten Hartweizens.

Mittlerweile arbeiten die Forscher daran, die Salztoleranz des Einkorns auch auf weitere Kultursorten zu übertragen. So zeigen erste Versuche, dass Weichweizen ebenfalls von dem Entsalzungsgen *TmHKT1;5-A* profitieren kann.

Nature Biotechnology
10.1038/nbt.2120, 2012

BIOLOGIE

Wüstenameisen verwenden Rüttel- und Magnetwegweiser

Auch wenn sich die Wüstenameise *Cataglyphis noda* mehrere Meter von ihrem winzigen Nesteingang entfernt, findet sie ihn wieder – obwohl ihre monotone Umgebung kaum Landmarken bietet. Hierfür nutzen die Tiere zahlreiche Hinweise. Schon länger ist bekannt, dass sie sich an der Polarisation des Sonnenlichts, am Sonnenstand und an der Windrichtung orientieren; außerdem haben sie einen inneren Schrittzähler, der die zurückgelegten Wegstrecken berücksichtigt. Weil diese Navigationshilfen bei langen Wanderungen aber ungenau werden, werten die Ameisen zusätzlich noch andere Reize aus, um wieder nach Hause zu finden, etwa gut erkennbare Geländeformationen oder den Geruch des Nests.

Forscher vom Max-Planck-Institut für chemische Ökologie in Jena haben nun gezeigt, dass die Tiere darüber hinaus zwei weitere Reize zur Orientierung verwenden können: örtliche Magnetfelder und Vibrationen. Letztere dienen den Tieren sonst eher zur sozialen Verständigung. Offenbar verfügt *Cataglyphis noda* also über einen hochflexiblen Orientierungssinn, der auf ganz verschiedene Reize zurückgreift und auch solche verarbeiten kann, die das Tier normalerweise in einem anderen Kontext verwendet.

PLoS ONE 7, e33117, 2012

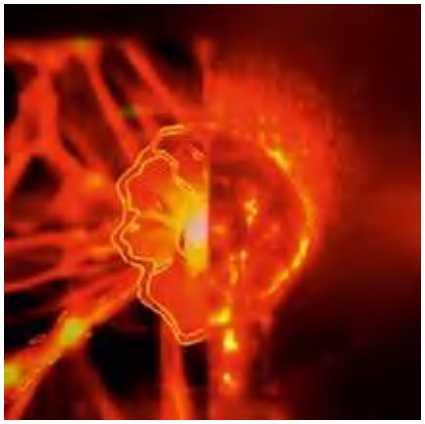
ELISA BADEKE-KNADEN, SONIA BISCH-KNADEN

Diese Laufarena bietet kaum Orientierungspunkte. Trotzdem finden die Ameisen zuverlässig zum künstlichen Nesteingang (vorn) zurück.

ASTROPHYSIK

So entstanden die ersten Magnetfelder

An vielen Orten im Weltall lassen sich Magnetfelder beobachten, die ganze Galaxien durchziehen. Doch wie sind sie entstanden? Ursprünglich wohl über den Biermann-Batterie-Effekt, schreiben Gianluca Gregori von der University of Oxford und seine Kollegen: Wenn Druck- und Temperaturgradienten in einem Plasma nicht parallel zueinander verlaufen, entstehen elektrische Ströme, die ihrerseits ein Magnetfeld hervorrufen. Die nötigen Bedingungen hierfür seien in den gewaltigen Stoßwellen erfüllt gewesen, die beim Schwerkraftkollaps von protogalaktischen Gaswolken auftraten, erläutern die Wissenschaftler.



A. RAVASIO & A. PELKA, LULI; J. MEINECKE & C. MURPHY, OXFORD / SIMULATION: F. MINIATI, ETHZ

Stoßwellen in Theorie und Praxis: Die linke Bildhälfte entstammt einer Computersimulation von Stoßwellen im frühen Universum. Die rechte Bildhälfte zeigt eine Wellenfront, die im Labor per Laserbeschuss erzeugt wurde. Helle Farben stehen dabei für hohe Dichten und Temperaturen.

Mit Laborexperimenten gelang es den Forschern, solche Vorgänge nachzustellen. In einer mit Helium gefüllten Kammer beschossen sie einen Kohlenstoffstab mit energiereichen Laserpulsen. Das erzeugte eine Stoßwelle in der Kammer, begleitet von kurzlebigen, starken Magnetfeldern. Laut Analyse der Daten müssen diese durch den Biermann-Batterie-Effekt entstanden sein.

Übertragen auf protogalaktische Strukturen könne der Effekt magnetische Flussdichten von etwa einem trilliardstel Gauß erzeugen, berichten die Wissenschaftler. Im Lauf der Zeit dürften Turbulenzeffekte diese schwachen Felder dann allmählich verstärkt haben, so dass sie irgendwann auch die Evolution der Galaxien beeinflussten.

Nature 481, S. 480–483, 2012

MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de

Aktuelle Spektrogramme
finden Sie täglich unter
www.spektrum.de/spektrogramm

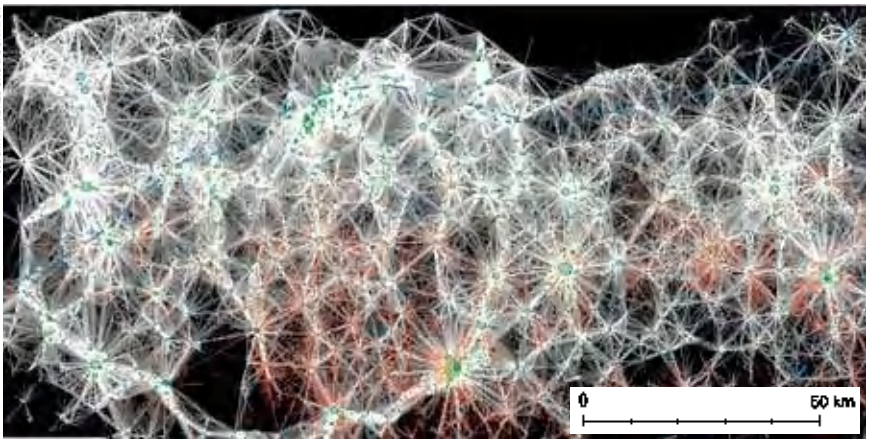
ARCHÄOLOGIE

Satellitenblick in die Siedlungsgeschichte

Die Gemeinwesen des alten Mesopotamien standen und fielen mit dem Zugang zum Wasser sowie der Einbindung ins regionale Wegenetz. Zu diesem Schluss kommen Björn Menze und Jason Ur von der Harvard University in Cambridge, Massachusetts. Sie werteten zahlreiche Satellitenaufnahmen des nordöstlichen Syrien aus. Das erlaubte es ihnen, die Besiedlung der Region über acht Jahrtausende hinweg zu rekonstruieren.

Historische Niederlassungen verraten sich auf Satellitenbildern durch eine veränderte Farbe, die auf die lang anhaltende Ablagerung von organischem Müll und Bauschutt zurückgeht. Menze und Ur erstellten ein Computerprogramm, das entsprechend verfärbte Strukturen in den Aufnahmen identifizierte. Zudem ermittelten sie die Höhe der Siedlungshügel, die recht verlässlich anzeigt, wie lange der jeweilige Ort bewohnt war. So erfassten die Forscher rund 14 000 teils unbekannte Stätten, die seit dem Ende der Jungsteinzeit mehr oder weniger dicht bevölkert gewesen waren.

Das alte Nordostsyrien. Grüne Punkte: Historische Siedlungen. Weiße und rote Linien: Alte Verbindungswege (je stärker, desto öfter frequentiert).



BJÖRN H. MENZE UND JASON A. UR

Es zeigte sich, dass die Siedlungen vor allem dann über große Zeiträume hinweg prosperierten, wenn sie stets Zugang zu Wasser hatten. Einige Niederlassungen blieben auch dadurch bedeutsam, dass sie an Knotenpunkten von Transportwegen lagen, die schon Jahrtausende vorher bestanden und ein überraschend dichtes Netzwerk bildeten. Diese uralten Wege lassen sich vor allem anhand von Fotos rekonstruieren, die Spionagesatelliten in den 1960er und 1970er Jahren aufgenommen hatten – vor den umfangreichen Bodenveränderungen der zurückliegenden Jahrzehnte.

PNAS USA 10.1073/pnas.1115472109, 2012

PHYSIK

Antiwasserstoff lässt sich spektroskopisch untersuchen

Wasserstoffatome aus Antimaterie lassen sich schon seit Mitte der 1990er Jahre künstlich herstellen. Mittlerweile kann man sie auch für etliche Minuten einsperren. Doch bisher fehlte die Möglichkeit, sie spektroskopisch zu untersuchen, um ihre Eigenschaften mit denen gewöhnlicher Materie zu vergleichen. Im Experiment ALPHA am Forschungszentrum CERN zeigen Physiker um Jeffrey Hangst von der Universität Aarhus (Dänemark) nun, dass solche Messungen an Antiwasserstoff mit heutiger Technik machbar sind.

Die Forscher sperrten Antiwasserstoffatome aus Antiprotonen und Positronen in eine magnetische Falle. Das Magnetfeld spaltet den Grundzustand des Antiatoms in zwei Energieniveaus auf – seine Hyperfeinstruktur. Nur in einem der beiden Zustände lässt sich das Teilchen in der Falle festhalten.

Das nutzten die Forscher aus: Sie bestrahlten die eingefangenen Antiatome mit Mikrowellen einer Frequenz, die sie in den anderen Zustand überführt. Die so behandelten Antiwasserstoffatome verschwanden deutlich öfter aus der Falle, als wenn sie anderen Frequenzen oder keiner Strahlung ausgesetzt waren. Das spricht stark für eine Wechselwirkung zwischen Mikrowellen und Antiatomen und eröffnet im Prinzip die Möglichkeit, das Hyperfeinspektrum von Antiwasserstoff präzise zu vermessen.

Durch den Vergleich mit dem Spektrum normalen Wasserstoffs ließe sich ein fundamentales Gesetz der Physik überprüfen: das CPT-Theorem. Es besagt, dass jeder mögliche Vorgang in Raum und Zeit auch dann physikalisch möglich ist, wenn man seine Raumkoordinaten spiegelt, die Zeit rückwärtslaufen lässt und überdies Teilchen mit Antiteilchen vertauscht. Das Ungleichgewicht zwischen Materie und Antimaterie im Universum könnte genau darauf zurückzuführen sein, dass das Theorem manchmal eben nicht gilt.

Nature 483, S. 439–444, 2012

BLICK AUF MERKUR

NASA, GSFC / JHUAPL / CIW-DTM / MIT / BROWN UNIVERSITY; RENDERING: JAMES DICKSON, JIM HEAD

Seit einem Jahr umkreist die NASA-Sonde Messenger den sonnennächsten Planeten Merkur. Aus den bislang per Laserhöhenmessung gesammelten Daten entstand nun die erste topografische Karte der Nordhalbkugel: Zwischen den tief liegenden, im Falschfarbenbild violett gekennzeichneten Flächen und den in Hellgrau gehaltenen Höhen links unten liegen 2300 Meter Höhenunterschied. Die ausgedehnte Ebene links oben entstand vermutlich vor etwa vier Milliarden Jahren durch Überflutung mit flüssiger Lava, während die sichtbaren Höhenzüge Folgen späterer tektonischer Prozesse sind. Die runden Strukturen stellen Einschlagkrater dar. Für die Karte hatten die Wissenschaftler um Maria Zuber vom Massachusetts Institute of Technology die Daten von 4,3 Millionen einzelnen Punkten ausgewertet. Die Unsicherheit bei den Höhenwerten beläuft sich dabei auf weniger als 20 Meter.

Science 10.1126/science.1218805, 2012

ASTROPHYSIK

Kosmische Raubtierfütterung

Erstmals werden Astronomen Gelegenheit haben, live zu beobachten, wie ein Schwarzes Loch eine Gaswolke zerreißt und sich einverleibt.

VON STEFAN GILLESSEN, REINHARD GENZEL UND ANDREAS BURKERT

Im Zentrum der Milchstraße schlummert ein Schwarzes Loch. Es ist rund vier Millionen Mal so schwer wie die Sonne, die in einer sicheren Entfernung von 25 000 Lichtjahren das Herz unserer Galaxie alle 200 Millionen Jahre umrundet. Solch ein Schwerkraftmonster konzentriert so viel Masse auf kleinem Raum, dass die starke Gravitation keine Strahlung mehr entkommen lässt. Beobachten kann man es also nur indirekt. Wenn etwa Gasteilchen in ein Schwarzes Loch stürzen, heizen sie sich stark auf und strahlen deswegen, bevor sie in die Unsichtbarkeit abstürzen. Und ein Schwarzes Loch kann sich durch die Wirkung seiner Schwerkraft bemerkbar machen.

Unsere Arbeitsgruppe am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik beobachtet seit 20 Jahren das Zentrum der Milchstraße, das von der Erde aus gesehen im Sternbild Schütze (Sagittarius) liegt. Wir haben dort Sterne entdeckt, die sich mit Geschwindigkeiten von vielen tausend Kilometern pro Sekunde auf elliptischen Bahnen bewegen – dieselbe Bahnform, die schon Johannes Kepler für die Bewegung der Planeten um die Sonne fand. Am spektakulärsten ist der Stern S2, der in nur 16 Jahren umläuft – um eine Stelle am Himmel, an der keine helle Strahlungsquelle auszumachen ist.

Aus den Bahndaten lässt sich schließen, dass die Masse, die S2 auf eine so enge Bahn zwingt, die genannten vier Millionen Mal so groß wie die Sonnenmasse sein muss und in einem Raumbereich konzentriert ist, der nicht größer ist als das Sonnensystem *(Spektrum der Wissenschaft 4/2003, S. 26–33)*. Die vernünftigste Erklärung dafür ist ein massereiches Schwarzes Loch.

Erstaunlich ist, wie dunkel es um das Schwarze Loch ist. Ein Objekt mit dieser Masse übt auf seine Umgebung gewaltige Anziehungskräfte aus. Entsprechend viel Materie müsste hineinstürzen und sich durch Strahlung bemerkbar machen. Würde das Schwarze Loch mit nur einem Prozent der maximal möglichen Rate Gas aus der Umgebung aufsaugen, müsste der Schwerkraftstrudel eine Million Mal so hell wie beobachtet erscheinen. Das Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße gehört damit zur Klasse der leuchtschwachen galaktischen Kerne und ist gleichzeitig der Prototyp dieser Gattung, denn wegen seiner vergleichsweise kleinen Entfernung können wir es viel genauer beobachten als das Zentrum jeder anderen Galaxie. Zwar haben wir 2003 entdeckt, dass es ein paar Mal pro Tag für jeweils etwa eine Stunde aufleuchtet; jedoch wird es dabei lediglich rund zehn bis hundert Mal so hell wie im Ruhezustand. Erklären kann man die Leuchtschwäche nur damit, dass das Schwarze Loch auf Diät gesetzt ist: Es schluckt zurzeit nicht mehr als ein hundertstel Erdmasse pro Jahr.

Flug ins Verderben

Das könnte sich bald ändern. Letztes Jahr haben wir eine überraschende Entdeckung gemacht: Eine Gaswolke mit ungefähr der dreifachen Erdmasse fliegt fast direkt auf das Schwarze Loch zu *(Nature 481, S. 51–54, 5. Januar 2012)*. Aus unseren Daten können wir – wie auch für die Sterne – ihre Bahn in allen drei Dimensionen bestimmen. Die Wolke hat eine Geschwindigkeit von mehr als 2000 Kilometern pro Sekunde und würde Mitte 2013 das Perizentrum erreichen, den Punkt ihrer Bahn, an dem sie dem Schwarzen Loch am nächsten ist. Sie wäre dann 36 Lichtstunden vom Ereignishorizont entfernt, nur rund doppelt so weit wie das Perizentrum von S2.

Im Gegensatz zu einem Stern, den seine eigene Schwerkraft zusammenhält, ist die Gaswolke den Kräften des Schwarzen Lochs hilflos ausgeliefert. Da die Gravitationskraft mit zunehmenden Abstand abnimmt, erfährt der vordere Teil der Wolke eine stärkere Anziehung als der hintere Teil. Dadurch wird die ursprünglich kugelrunde Wolke zu einem langen Filament auseinandergezogen. Man spricht von Gezeitenwirkung, weil auch für Ebbe und Flut auf der Erde die Abnahme der Schwerkraft – in diesem Fall des Monds – mit zunehmender Entfernung verantwortlich ist.

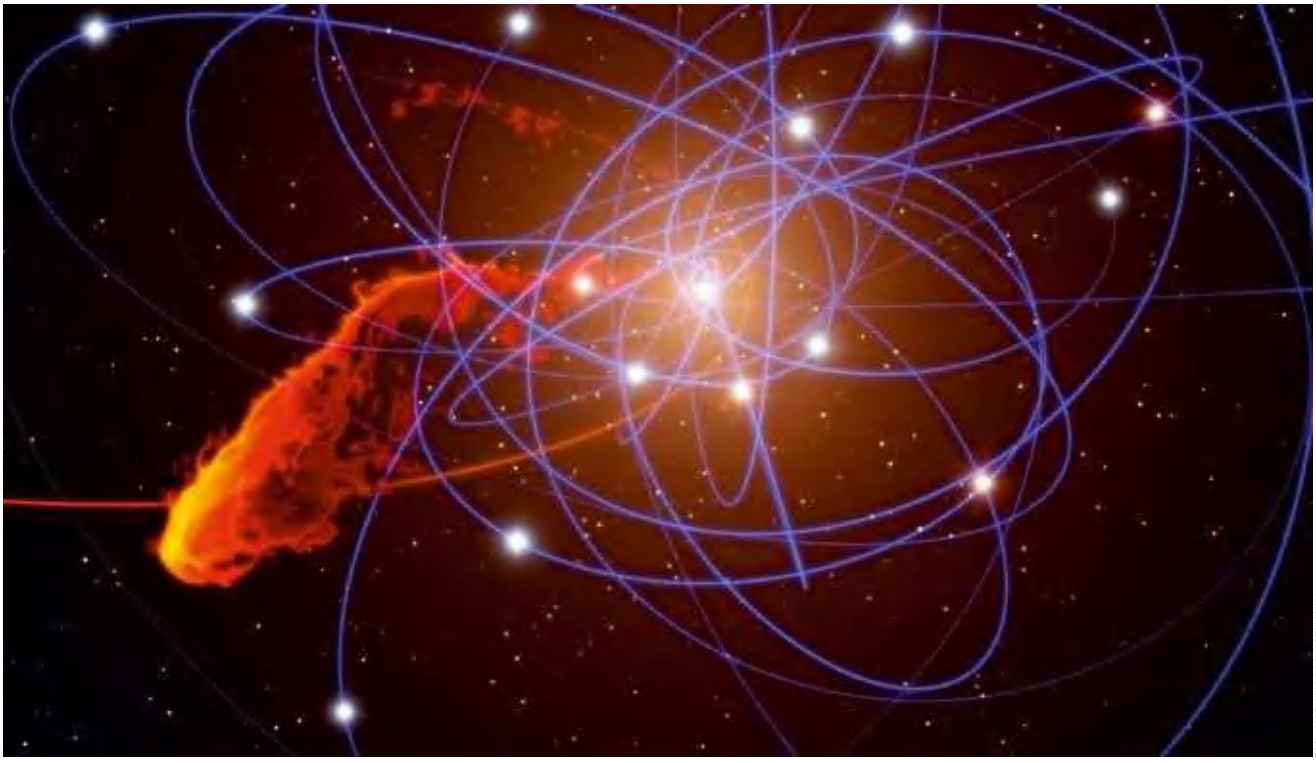
Das können wir jetzt schon beobachten: Während die Wolke in den Daten des Jahres 2004 kugelsymmetrisch aussah, bewegte sich bereits 2008 der vordere Teil etwas schneller als der hintere, und 2011 war diese Geschwindigkeitsdifferenz noch stärker ausgeprägt. Wir können also zusehen, wie die Gaswolke auf ihrem Weg zerstört wird.

Nicht nur die Gezeiten zerren an der Gaswolke. Das Schwarze Loch ist umgeben von einem sehr dünnen, aber viele Millionen Grad heißen Gasplasma. Dessen räumliche Verteilung und Temperatur könnten erklären, warum das Schwarze Loch zurzeit so wenig Mate-

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de

Video zum Thema mit Stefan Gillessen und Animationen

www.spektrum.de/kosm-gaswolke



ESO / MPE, MARC SCHARTMANN

Blick in die Zukunft: Die Gaswolke, die zurzeit auf einer elliptischen Bahn (rote Linie, von links kommend) auf das Schwarze Loch (Bildmitte) im Zentrum der Milchstraße zufliegt, wird von Gezeitenkräften zerfetzt und durch Wechselwirkung mit dem Gasplasma rund um das Schwarze Loch aus der Bahn geworfen werden. Neben der mutmaßlichen Gestalt der Wolke sind die Bahnen der benachbarten Sterne (blaue Linien) sowie ihre Positionen (leuchtende Scheiben) im Jahr 2021 dargestellt. Die kleinste Ellipse gehört zum Stern S2.

rial verschlingt. Wir müssten nur diese Eigenschaften besser kennen. Genau dafür bietet die Gaswolke nun eine einzigartige Möglichkeit.

Auf ihrem Weg ins Verderben durchquert sie das Plasma mit Überschallgeschwindigkeit, das heißt schneller, als sich Druckschwankungen in diesem Medium ausbreiten können. Dadurch wird derselbe Effekt eintreten wie beim Überschallknall: Eine Stoßfront wird sich ausbilden, das heißt eine scharf begrenzte Zone erhöhter Dichte und Temperatur. Wahrscheinlich wird sie heiß genug werden, um im Röntgenlicht aufzuleuchten. Doch spätestens wenn die Gezeiten die Wolke Mitte 2013 zerrissen haben werden, bestimmt die schwer vorherzusagende Hydrodynamik des umgebenden Plasmas die weitere Entwicklung – insbesondere wie schnell das Gas der Wolke in das Schwarze Loch fällt. Es ist gut möglich, dass diesem nun einige fette Jahre bevorstehen. Wir sind sehr gespannt auf das zu erwartende Feuerwerk.

Es wäre allerdings nicht das erste seiner Art. Röntgenbeobachtungen deuten darauf hin, dass vor rund 300 Jahren ein ähnlicher Strahlungsausbruch stattfand. So ließe sich zumindest das Röntgenlichtecho erklären, das sich wie eine Wellenfront in das interstellare Material in der weiteren Umgebung unseres galaktischen Zentrums ausbreitet. Durch Zurückrechnen ergibt sich, dass damals etwas mehr Energie frei geworden ist, als in der nun entdeckten Gaswolke steckt. Demnach wäre eine entsprechend größere Masse in das Schwarze Loch gestürzt.

Woher kommt die aktuelle Gaswolke? Ihre Bahn liegt in derselben Ebene, in der sich auch eine Gruppe von jungen, massereichen Sternen bewegt. Diese entstanden vor rund sechs Millionen Jahren gemeinsam und umrunden das Schwarze Loch in einer Scheibe. Ihr innerer Rand befindet sich in etwa dort, wo die Kepler-Ellipse der Gaswolke ihren fernsten Punkt hat. Die jungen Sterne verlieren vergleichsweise viel Material. Diese Sternwinde haben vergleichbare Geschwindigkeiten wie die Sterne selbst. Es ist also plausibel, dass sich die Gaswolke als eine Verdichtung in einem solchen Sternwind gebildet hat und dann auf einer sehr exzentrischen Bahn in Richtung Schwarzes Loch fallen konnte. Bereits früher durchgeführte Simulationen der Sternwinde bestätigen diese Idee.

Vielleicht ist unsere Gaswolke aber auch eine Gas- und Staubscheibe um einen Protostern, wie man sie in vielen Sternentstehungsgebieten findet. Der Stern selbst ist nicht zu sehen, doch die Scheibe wird in der harschen Umgebung allmählich zerstört und durch die starke Ultraviolettstrahlung der jungen Sterne zum Leuchten angeregt.

Unter beiden Annahmen für die Vorgeschichte erstaunt es, dass die Gaswolke so nah an das Schwarze Loch heran-

gekommen ist. In jedem Fall erwarten wir, dass sie im Lauf der nächsten zwölf Monate zerstört wird. Entsprechend spannend werden die folgenden Jahre werden. Wie genau wird die Gaswolke auseinandergerissen, und was können wir daraus über das heiße Gas um das Schwarze Loch lernen? Warum hat dieses bislang so wenig Materie geschluckt? Wie viel Gas wird hineinfallen? Wie hell wird es aufleuchten? Können wir den Ursprung der Gaswolke aufklären? Können wir etwas über leuchtschwache Galaxienkerne im Allgemeinen lernen?

Wir werden uns die Gelegenheit nicht entgehen lassen, dem Schwarzen Loch beim Speisen zuzusehen.

Stefan Gillessen, **Reinhard Genzel** und **Andreas Burkert** sind Astrophysiker am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching.

BIOLOGIE

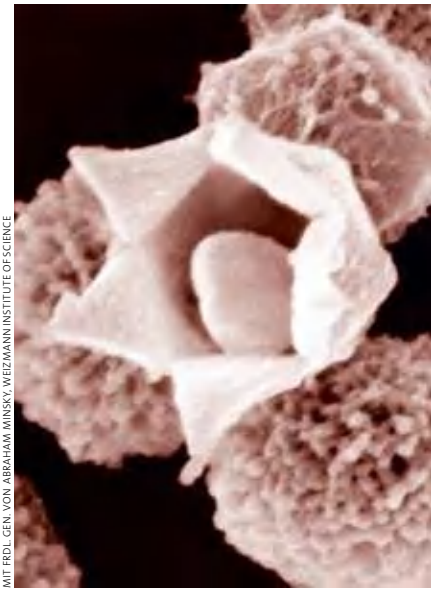
Revolution der Riesenviren

Gigantische Viren rütteln am akzeptierten biologischen Weltbild: Möglicherweise bilden sie gar eine neue, vierte Domäne des Lebens. Zwar ist diese Frage noch lange nicht geklärt, doch immerhin vermittelt die genetische Ausstattung der Riesenviren zunehmend Einblicke in ihre evolutionären Wurzeln.

VON STEFANIE REINBERGER

Als Wissenschaftler 1992 das erste Riesenvirus entdeckten, erkannten sie zunächst gar nicht, was sie da in ihren Reagenzgläsern hatten. In Proben aus dem Wasserkreislauf eines Industriekühlturms in Bradford, Großbritannien, hatten sie Amöben gefunden, die mit einer unbekannten »Mikrobe« infiziert waren. Die Forscher ordneten Letztere den grampositiven Bakterien zu und tauften sie *Bradfordcoccus*.

Erst Jahre später, 2003, wurde Didier Raoult von der Université de la Méditerranée in Marseille klar: Das vermeintliche Bakterium ist ein Virus – wenn auch eigentlich viel zu groß. Mit seinem Durchmesser von 750 Nanometern übertrifft es kleine intrazelluläre Bakterien und ist sogar im Lichtmikroskop zu sehen. Der Franzose nannte den Riesen *Mimivirus*, von »mimicking microbe«: ein Virus, das sich als Bakterie ausgibt.



MIT FRDL. GEN. VON ABRAHAM MINSKY, WEIZMANN INSTITUTE OF SCIENCE

Die elektronenmikroskopische Aufnahme von Mimiviren zeigt eines davon weit geöffnet. Auf diese Weise setzt das Virus sein Genom in befallenen Amöben frei, worauf dort neue Viren entstehen.

2004 warteten Raoult und sein Kollege, der Genetiker und Bioinformatiker Jean-Michel Claverie, mit der Sequenz des doppelsträngigen DNA-Genoms auf – sowie mit neuen Überraschungen. So übertrifft das Erbgut mit 1,2 Millionen Basenpaaren das bis dahin größte bekannte Virusgenom um das Doppelte. In ihm verschlüsselt sind rund 1000 Gene; manches Bakterium besitzt weniger.

Noch erstaunlicher war, dass die Giganten eine ganze Reihe von Genen enthalten, die in einem Virus eigentlich nichts zu suchen haben: beispielsweise einige Stoffwechselenzyme und essenzielle Proteine, die helfen, die Bauanleitung für Eiweißmoleküle zu übersetzen. Solche Werkzeuge benötigt ein Virus normalerweise nicht, da es dafür jene seines Wirts nutzt.

Raoult stellte daraufhin eine gewagte These auf. Der virale Riese gehöre zu einer vierten, bislang unbekannten Domäne des Lebens – neben den drei etablierten Domänen der Archeen (Archäobakterien), der Bakterien sowie der Eukaryoten, zu denen Pilze, Pflanzen und Tiere zählen, darunter auch viele einzellige Organismen. Das schloss er aus vergleichenden Analysen »ubiquitärer Proteine«, hochkonservierter Eiweißstoffe, die sich quer durch alle Lebensformen finden. Evolutionsbiologen nutzen solche Moleküle, um Stammbäume zu erstellen, nach der Regel: Je größer die Übereinstimmung, desto enger das Verwandtschaftsverhältnis. Mindestens sieben solche Proteine stecken auch im *Mimivirus*-Genom. Ein Vergleich mit Vertretern aller drei bereits bekannten Domänen ergab verblüffende Unterschiede. Es schien, als zweige vom Stammbaum des Lebens ein weiterer Ast ab, den Forscher bislang noch nicht zur Kenntnis genommen hatten (siehe Kasten rechts, oberes Bild).

Die Vermutung rief Kritiker auf den Plan, die methodische Fehler witterten. Schließlich fließen in Stammbaumana-

lysen mitunter vorgefertigte Vorstellungen der Wissenschaftler von der Evolution ein. Entsprechend legten Forscher um Eva Heinz von der University of Newcastle, Großbritannien, ihren Sequenzvergleichen alternative evolutionäre Modelle zu Grunde und kamen zu einem völlig anderen Ergebnis. Im Juni 2011 veröffentlichten sie ihre Stammbäume – und von einer vierten Domäne ist darin nichts zu sehen *(PLoS One 6, e21080, 2011)*. Vielmehr verteilen sich hier die Gene der Virengiganten auf mehrere Äste in der Nähe der Eukaryoten. Heinz und ihre Kollegen vermuten: Die Riesen peppten ihr Erbgut im Lauf der Evolution per Gendiebstahl auf.

Genetisches Diebesgut

Tatsächlich neigen Viren dazu, sich DNA-Abschnitte aus dem Genom ihres Wirts einzuverleiben und in das eigene einzubauen. Für einen Teil der virusuntypischen Gene mag das sogar zutreffen. »Allerdings gleichen nur rund zehn Prozent der Virusgene ihren Gegenstücken in der Wirtszelle ausreichend, um als Diebesgut durchzugehen«, sagt dazu Matthias Fischer vom Max-Planck-Institut für medizinische Forschung in Heidelberg. Der Meeresvirologe untersuchte als Doktorand an der University of British Columbia in Vancouver einen weiteren Virengiganten: das *Cafeteria roenbergensis Virus* (CroV), benannt nach einem Meereseinzeller, den es infiziert. Es ist nur wenig kleiner als das *Mimivirus*, aber ähnlich komplex und rätselhaft. Fischer betont: »Mehr als die Hälfte der Gene von *Mimivirus* und CroV weist keinerlei Ähnlichkeit zu bekannten Genen auf.«

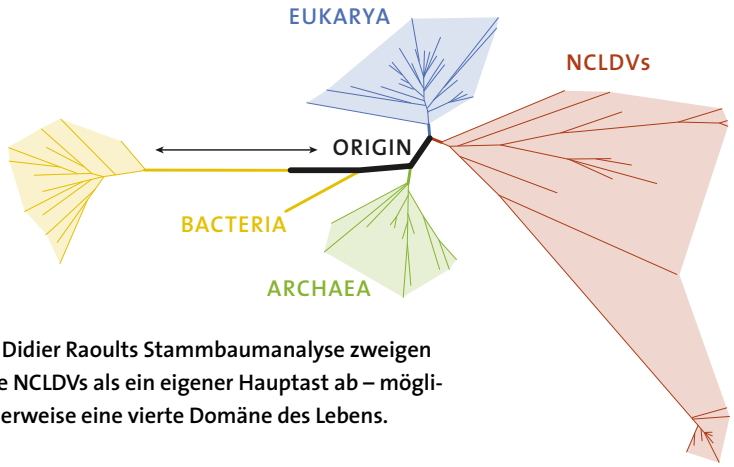
Auf Mutationen lassen sich die enormen Differenzen nicht schieben. Man darf sich die Riesenviren nicht etwa wie den Aidserreger HIV vorstellen, dessen Erbgut sich rasend schnell verändert. »Die Gene von *Mimivirus* und CroV scheinen kaum rascher zu mutieren als die von Bakterien«, erklärt Fischer.

Der Heidelberger Forscher bevorzugt eine andere Erklärung für die seltsamen Gene. Demnach besaß das Virus sie von Anfang an – als Erbe einer mit Eukaryoten verwandten Lebensform, die so heute vermutlich nicht mehr existiert. Claverie hat dazu eine Theorie formuliert *(Trends Genet. 26, S. 431–437, 2010)*. Ihr zufolge verlor ein einzelliger Vertreter einer inzwischen ausgestorbenen Zellinie einen Teil seines genetischen Bausatzes und war fortan gezwungen, ein parasitäres Dasein in anderen Zellen zu fristen. Nach und nach warf er molekularbiologischen Ballast ab – typisch für

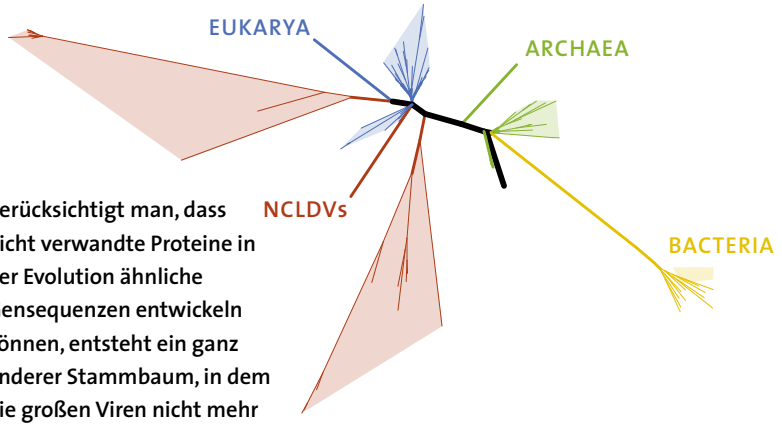
Weitläufige Virenverwandtschaft

Riesenviren zählen zu den »Nucloecytoplasmic large DNA Viruses«, kurz NCLDV. Dabei handelt es sich um eine nicht offizielle große Gruppierung, die mehrere Virusfamilien zusammenfasst. Neben der Familie der Mimiviridae zählt dazu unter anderem die Familie der Poxviridae, der Pockenviren.

Allen NCLDV-Vertretern gemeinsam ist ein Repertoire von fünf Genen, rund drei Dutzend weitere kommen in den meisten Viren dieser Gruppe vor. Solche Überschneidungen im Erbgut könnten auf einen gemeinsamen evolutionären Ursprung hindeuten. Das ist jedoch noch nicht endgültig geklärt. Die Familie der Mimiviridae, deren am besten charakterisierte Vertreter *Mimivirus*, CroV und *Megavirus* sind, stellt die einzigen echten Riesen in der Gruppe. Und auch nur sie beherbergen ein virusuntypisches Set an Genen für die Proteinsynthese. Eine Erklärung dafür könnte lauten, dass andere NCLDV-Vertreter diese Gene im Lauf der Evolution verloren haben. Das würde bedeuten, dass Riesenviren einen Blick weit zurück in die Geschichte der Viren erlauben, was sie zu einem besonders spannenden Forschungsobjekt macht.



In Didier Raoults Stammbaumanalyse zweigen die NCLDVs als ein eigener Hauptast ab – möglicherweise eine vierte Domäne des Lebens.



Berücksichtigt man, dass nicht verwandte Proteine in der Evolution ähnliche Gensequenzen entwickeln können, entsteht ein ganz anderer Stammbaum, in dem die großen Viren nicht mehr zusammen gruppiert sind.

NATURE, NACH: BOYER, M. ET AL., PLOS ONE 5, E15530, 2010, FIG. 2 (OBEN); WILLIAMS, T. A. ET AL., PLOS ONE 6, E21080, 2011, FIG. 1 (UNTEN)

intrazelluläre Parasiten. Übrig blieb eine abgespeckte Version, die sich irgendwann die Geninformation für das Kapsid, das DNA-umschließende Hüllprotein eines Virus, einverleibte. Ein viraler Gigant war »geboren«.

Zu der Theorie passt, dass Riesenviren sich nicht wie andere Viren über den Zellkern ihres Wirts vermehren. Vielmehr bilden sie eine Art Virenfabrik, die sich gleich einem Organell – oder eben einem Parasiten – im Zytoplasma ausbreitet und Nachwuchs produziert. Dabei sind sowohl virale als auch zelluläre Genprodukte beteiligt. Mehr noch: *Mimivirus* und CroV können ihrerseits von kleineren Viren befallen werden, so genannten Virophagen. Diese sind in der Lage, die Riesenviren zu schwächen, wovon wiederum die Wirtszellen profitieren. Wie das genau funktioniert, ist noch unklar und steht im Zentrum von Fischers derzeitigen Forschungen. »Die Virophagen vermehren sich innerhalb der Riesenviren-Fabrik und scheinen dort hauptsächlich Proteine des Virus statt zellulärer Eiweißmoleküle zu nutzen«, sagt er. »Das unterstreicht wiederum, wie außergewöhnlich komplex Riesenviren sind.«

Virale Giganten in den Weltmeeren

Doch letztlich wissen wir einfach noch zu wenig über die Riesen. Schließlich sind bislang erst drei davon wirklich charakterisiert: Zu *Mimivirus* und CroV gesellte sich kürzlich *Megavirus chilensis*, das ein noch etwas größeres Genom aufweist als *Mimivirus (PNAS 108, S. 17486–17491, 2011)* und wie Letzteres ebenfalls eigene Proteine für die Eiweißsynthese besitzt. Weitere beschriebene Vertreter wie *Courdovirus* müssen erst noch eingehender untersucht werden, bevor es möglich ist, sie richtig einzuordnen. Wissenschaftler wie Fischer und Claverie vermuten aber noch mehr virale Giganten in den Weiten der Weltmeere. Neue Informationen erhoffen sie sich beispielsweise vom TARA-Oceans-Projekt, das sich der Suche nach unbekannten Mikroorganismen, Viren und Planktonarten widmet.

Ein ähnliches Unternehmen, Craig Venters Global Ocean Sampling Expedition, sorgte letztes Jahr kurzzeitig für Aufruhr. Die beteiligten Wissenschaftler hatten Erbgutschnipsel aus dem Meer gefischt, die sich ebenfalls keiner bekannten Lebensform zuordnen ließen – und brachten die Diskussion um weitere Zweige im Baum des Lebens wieder zum Brodeln *(PloS One 6, e18011, 2011)*. Mit den Riesenviren hat diese Entdeckung jedoch vermutlich nichts zu tun. »Es zeigt aber, wie wenig wir über die Vielfalt und Evolution der mikrobiellen Welt sowie über das Leben im Meer wissen«, betont Fischer.

Stefanie Reinberger ist promovierte Biologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Köln.

QUANTENCOMPUTER

Bald Qubits auf der Datenautobahn?

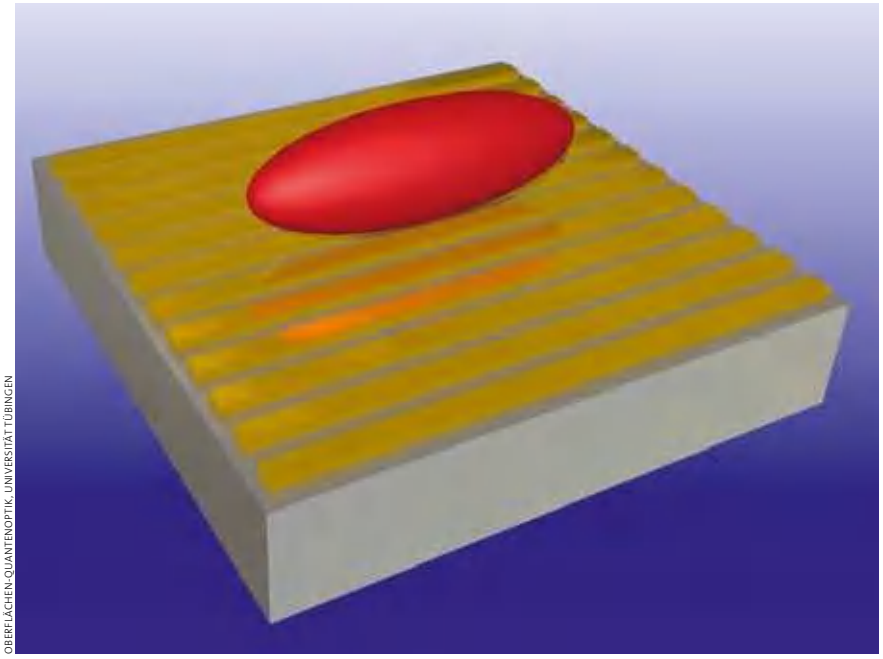
Auf dem langen Weg zu einer Datenautobahn für Quantencomputer ist es Tübinger Forschern gelungen, ultrakalte Atomwolken und winzig kleine »Lichtpunkte« kontrolliert wechselwirken zu lassen.

VON STEFAN A. MAIER

Was werden die Quantencomputer der Zukunft wohl unter der Chiphaube haben? Die Frage ist reizvoll, doch es lohnt nicht, über Einzelheiten zu spekulieren; der Weg zu einem Rechenriesen, der nach den Gesetzen der Quantenmechanik arbeitet, ist schließlich noch weit. Eines gilt jedoch als sicher: Eine solche Maschine benötigt wie heutige Computer einen Speicher, um Informationen zuverlässig in so genannten Quantenbits, kurz Qubits, aufzubewahren, sowie einen Datenbus zum Informationsaustausch zwischen den einzelnen Komponenten des Rechners.

Ein möglicher Kandidat für den Speicher sind bis fast auf den absoluten Nullpunkt abgekühlte Gaswolken. In solchen so genannten Bose-Einstein-Kondensaten befinden sich sämtliche Atome im selben quantenmechanischen Zustand. Forscher haben in den letzten Jahren gezeigt, dass diese ultrakalten Wolken eine Unmenge von Informationen speichern können und sich mit Hilfe mikroskopisch kleiner Magnetfallen auch gezielt manipulieren lassen. Für den Datenbus wiederum eignen sich wohl Photonen am besten, die Grundeinheiten des Lichts – man denke nur an die rasanten Übertragungsgeschwindigkeiten im Internet, die durch Licht leitende Glasfasern möglich wurden.

Arbeitet der Speicher ebenso wie der Datenbus mit Licht, sollten sich beide auch miteinander verknüpfen lassen. Der Realisierung einer solchen Schnittstelle steht allerdings ein großes Problem im Weg: die Beugungsgrenze der Optik. Sie ist dafür verantwortlich, dass sich Licht nicht auf beliebig kleinen Raum einengen lässt. Darum träumt die Halbleiterindustrie bislang vergeblich von optischen Leiterbahnen auf ihren Chips, welche die Transistoren miteinander verbinden. Infolge dieser Grenze können die Forscher weder Glasfasern so verkleinern, dass sie die üblichen Kupferleitbahnen ersetzen könnten, noch sind sie in der Lage, optische Verbindungen zwischen den extrem miniaturisierten Transistoren und den vergleichsweise großen Lichtleitern herzustellen.



OBERFLÄCHEN-QUANTENOPTIK, UNIVERSITÄT TÜBINGEN

Eine auf wenige milliardstel Kelvin abgekühlte Rubidiumatomwolke (rot) wird einer metallischen Struktur aus Golddrähten angenähert. Bei der entstehenden Wechselwirkung zwischen der Atomwolke (dem »Datenspeicher«) und elektromagnetischen Wellen (dem »Datenbus«) auf den Golddrähten kann im Prinzip auch Information ausgetauscht werden.

Die Sache wird zwar nicht einfacher, wenn man mit Atomwolken statt Transistoren arbeitet. Doch nun hat eine von Sebastian Slama geleitete Nachwuchsforschergruppe am Physikalischen Institut der Universität Tübingen einen wichtigen Fortschritt erzielt *(Nature Photonics 5, S. 494 – 498, 2011)*. Dem Team ist es erstmals gelungen, ein Bose-Einstein-Kondensat kontrolliert mit Lichtpunkten wechselwirken zu lassen, deren winzige Abmessungen unterhalb der Beugungsgrenze lagen.

Es gibt nämlich doch einen Trick, um Licht über diese Grenze hinweg einzuengen. Bestrahlt man eine Metalloberfläche mit einem Laser, können die Photonen mit den frei beweglichen Elektronen im Metallgitter so in Kontakt treten, dass sich eine Art elektromagnetische Oberflächenwelle ausbildet. Die freien Elektronen bilden dabei so etwas wie ein Elektronenplasma; Fachleute bezeichnen die entstehenden Wellen darum als Oberflächenplasmonen. Man kann sie sich aber auch einfach wie Wasserwellen vorstellen, die über eine sonst glatte Wasseroberfläche wandern – nur dass sie eben aus Licht bestehen. Auch so genannte lokalisierte Plasmonen können auf diese Weise entstehen; dies sind Wellen, die an ein und demselben Ort auf- und abschwingen.

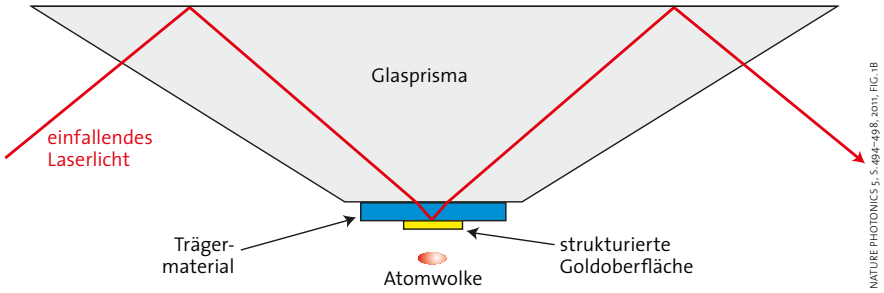
ANZEIGE

Nun folgt der Clou: Die räumliche Ausdehnung der elektromagnetischen Plasmonen ist nicht der Beugungsgrenze unterworfen. Die Intensität des Lichtfelds nimmt in alle Richtungen so schnell ab, dass seine Abmessungen unterhalb der Grenze liegen. Wenn die Oberfläche strukturiert ist, zum Beispiel als Hügellandschaft mit typischen Abmessungen von einigen hundert Nanometern, verteilt sich das Licht entsprechend. Mit einer schachbrettartigen Struktur lässt sich so ein regelmäßiges zweidimensionales Gitter aus winzigen »Lichtpunkten« erzeugen, also aus lokalisierten Plasmonen mit hoher Feldintensität.

Die Tübinger Forscher haben in ihrem Experiment nun gezeigt, dass sie die Wechselwirkung derartiger Lichtfelder mit einem Bose-Einstein-Kondensat präzise kontrollieren können. Dazu überzogen sie ein Trägermaterial mit einer dünnen Goldschicht. Diese Schicht strukturierten sie dann mittels einer Lithografiemethode aus der Halbleitertechnik. Anschließend verbanden sie das Prisma mit dem Trägermaterial (Grafik rechts oben) und steckten es in eine Vakuumröhre.

Nun ging es zur Sache. Vorsichtig brachten die Forscher Rubidiumatome in das Vakuum ein. In unmittelbarer Nähe zur Metalloberfläche wurden diese zunächst mit Hilfe von Laserstrahlen abgekühlt und dann mittels einer magnetischen Falle zu einem wolkenförmigen Bose-Einstein-Kondensat verdichtet. Ein Computer steuerte die genaue Position der Magnetfalle, so dass sich die Wolke mit kontrollierter Geschwindigkeit der strukturierten Metalloberfläche annähern ließ.

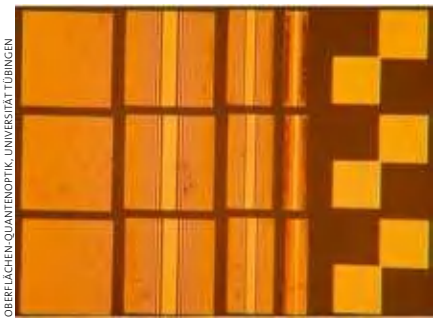
Gleichzeitig sorgte ein auf das Prisma gerichteter Laserstrahl für die Entstehung von Plasmonen auf der Metalloberfläche. Die Wellenlänge des Laserstrahls war so ausgewählt, dass sich in den entstehenden Lichtfeldern elektrische Dipolmomente ausbildeten, welche die Atome der Wolke abstießen – und zwar umso stärker, je mehr sich die Wolke der Oberfläche näherte. In unmittelbarer Nähe zur Metalloberfläche kam allerdings eine weitere Kraft ins Spiel, die so genannte Casimirkraft. Im Gegensatz zu den Lichtfeldern wirkte sie anziehend auf die Wolke.



Ein Laserstrahl, der durch ein Prisma geschickt wird, regt in einer gezielt strukturierten Goldoberfläche Oberflächenplasmonen an. Anschließend untersuchen die Forscher deren Wechselwirkung mit einer langsam angenäherten ultrakalten Atomwolke, einem so genannten Bose-Einstein-Kondensat.

Wechselspiel zwischen Casimirkraft und abstoßenden Lichtfeldern

Nun hing alles von der Geschwindigkeit der Gaswolke ab. Waren deren Atome schnell genug, um trotz Abbremsung in den Bereich der Casimirkraft einzudringen, verließen sie die Wolke und lagerten sich an der Metalloberfläche an. Waren sie hingegen zu langsam, wurden sie reflektiert. Indem die Forscher die Zahl der reflektierten Atome bestimmten, konnten sie das Wechselspiel zwischen der die Wolke anziehenden Casimirkraft und den abstoßenden Lichtfeldern ausmessen.


OBERFLÄCHEN-QUANTENOPTIK, UNIVERSITÄT TÜBINGEN

Mit einer schachbrettartigen Struktur (Foto) der teilweise nur tausendstel Millimeter dicken Golddrähte sorgen die Forscher dafür, dass Oberflächenplasmonen, also über das Metall wandernde Lichtfelder, die gewünschte Form annehmen.

Tatsächlich beeinflusste die Struktur der Metalloberfläche die Stärke der abstoßenden Lichtkraft genau so, wie es die Theorie der Oberflächenplasmonen vorhersagt. Das Team um Slama hatte damit nachgewiesen, dass strukturierte Lichtfelder mit Abmessungen unterhalb der Beugungsgrenze kontrolliert mit Bose-Einstein-Kondensaten in Wechselwirkung treten können – ein konzeptioneller Durchbruch.

Während die Beugungsgrenze in Lichtmikroskopen schon in den 1990er Jahren überwunden worden war *(siehe zuletzt SdW 2/2012, S. 18)*, ist dies nun also auch für die Quantenoptik gelungen. Vor dem Einsatz der Technik in einem möglichen Quantencomputer ist allerdings noch viel Arbeit nötig. Den Tübingern ist klar, dass sie bislang keine Information zwischen Bose-Einstein-Kondensat und plasmonischen Lichtfeldern austauschen konnten. Als Nächstes wollen sie daher eine im quantenmechanischen Zustand des Kondensats kodierte Information, ein Qubit, auf kontrollierte Weise in die Lichtfelder übertragen, diese dann über die Metalloberfläche bewegen und schließlich dazu veranlassen, das Qubit an ein zweites Kondensat abzugeben. Die Information würde also vom Speicher über den Datenbus zu einem anderen Speicher transportiert. Damit wäre das Grundprinzip eines Datenbusses für Quanten praktisch demonstriert.

Stefan A. Maier ist Professor für Physik am Imperial College in London.

PHYSIOLOGIE

Feinfühlige Spinnen

Die Jagdspinne *Cupiennius salei* erlegt ihre Beute mit einem gezielten Sprung – und das sogar in völliger Dunkelheit. Denn sie ortet ihre Opfer anhand der winzigen Erschütterungen des Untergrunds, die diese beim Laufen verursachen.

VON CLEMENS SCHABER

Cupiennius salei ist mit zehn bis zwölf Zentimeter Beinspannweite recht groß. Sie lebt vor allem im südlichen Mexiko und im nördlichen Guatemala und hält sich häufig auf Bromelien und Bananenpflanzen auf. Ihr Gift ist für den Menschen ungefährlich, wirkt aber äußerst effektiv gegen die Insekten, die auf dem Speiseplan der Spinne stehen. Bei Anbruch der Dunkelheit verlässt *Cupiennius salei* ihren Schlupfwinkel, setzt sich auf lange schmale Blätter und lauert dort. Wenn ein Beutetier näherkommt – häufig sind es nachtaktive Schaben, Grillen, kleine Frösche und Nachtschmetterlinge –, springt sie es mit einem gezielten Satz an, umklammert es mit ihren Beinen und beißt zu. Im Laborexperiment gelingt den Spinnen das sogar dann, wenn ihre Augen abgedeckt sind.

Offenkundig reagieren sie auf die Frequenzen und Amplituden der Vibrationen, die das Beutetier bei seinen Bewegungen auf den Untergrund überträgt. Anhand dieser Schwingungsmuster bemerkt die Spinne auch das Näherkommen eines natürlichen Feinds, woraufhin sie flüchtet. Hochempfindliche Vibrationsdetektoren, die sich an den äußersten Gelenken ihrer acht Beine befinden, erlauben es der Spinne, solch feine Erschütterungen zu registrieren. Indem sie die Zeitunterschiede auswertet, mit denen ein Vibrationssignal bei den einzelnen Sensoren ankommt, kann sie die Richtung zur Quelle sehr genau ermitteln.

Bei Spinnen ist die äußere Körperdecke (Cuticula) durch Proteine und Chitinfasern zu einem Außenskelett verstärkt. Es ist ähnlich elastisch wie die Knochen von Wirbeltieren. Jedes Spinnenbein besteht aus sieben starren Röhrengliedern, die durch Gelenke flexibel verbunden sind. Muskeln, Sehnen und Nerven liegen innerhalb des schützenden Cuticulapanzers. Die Vibrationsdetektoren, die bei *Cupiennius salei* und anderen Spinnentieren an den Beingelenken sitzen, zählen zu den so genannten lyraförmigen Organen, die Spannungen im Außenskelett registrieren.

CLEMENS SCHABER

Ein ausgewachsenes Weibchen der Spinnenart *Cupiennius salei*. Die Pfeile deuten auf die Stellen, an denen die Vibrationssensoren sitzen.

Extrem empfindlicher Bewegungssensor

Diese Organe bestehen im Wesentlichen aus winzigen Schlitzen in der Cuticula, zwei bis vier Mikrometer breit und bis zu 200 Mikrometer lang, die mit einer dünnen, nach innen gewölbten Membran bedeckt und mit Sinneszellen ausgestattet sind. Wenn der Untergrund vibriert oder die Spinne sich fortbewegt, wirken Kräfte auf ihre Beine. Dadurch verändert sich die Lage der Beinglieder zueinander, und es entstehen mechanische Spannungen im Außenskelett, die die Schlitze zusammenpressen. Infolgedessen verformen sich die Fortsätze der Sinneszellen, die mit der spaltbedeckenden Membran verbunden sind, was Ionenflüsse in den Sinneszellen und letztlich Aktionspotenziale auslöst.

Beim Vibrationsdetektor von *Cupiennius salei* sind 21 solcher Schlitze nahezu parallel angeordnet und charakteristisch gruppiert. Wenn der Untergrund zittert, schwingt das äußerste Beinglied der Spinne, der Tarsus, mit. Dadurch drückt dessen Oberkante gegen die Unterkante des nächsthöheren Beinabschnitts, des Metatarsus (siehe Bild oben). Dies komprimiert die Schlitze der lyraförmigen Organe auf der Oberseite des Metatarsus.

Um die Vibrationsdetektoren zu reizen, genügen bereits Untergrundschwankungen mit einer Auslenkung von 4,5 Nanometern (bei der Reizfrequenz von 1000 Hertz) – das ist weniger als die Dicke einer Zellmembran! Diese winzigen Vibrationen verändern den Winkel zwischen Tarsus und Metatarsus um gerade einmal 0,05 Grad. Sie entsprechen einer vom Untergrund auf den Tarsus wirkenden Kraftänderung um 0,9 Mikronewton, wie meine Kollegen und ich gemessen haben.

Die Kraft, mit der der Tarsus gegen den Metatarsus drückt, steigt mit grö-

ßeren Winkeln exponentiell an. Das Anordnungsmuster der Schlitze und ihre unterschiedlichen Empfindlichkeiten ermöglichen es dem Vibrationsdetektor, einen breiten Bereich von Reizstärken zu verarbeiten. Das ist sinnvoll, da aus der Umwelt der Spinne je nach Reizquelle – Beutetier, Geschlechtspartner oder Feind – stark variierende Vibrationsamplituden zu erwarten sind, die sich über einen Bereich von mehreren Zehnerpotenzen erstrecken.

Aufgereiht wie Orgelpfeifen

Ein anderes lyraförmiges Organ, der so genannte Propriorezeptor, misst Verformungen des Außenskeletts, die von aktiven Beinbewegungen der Spinne herrühren. Er sitzt am nächsthöheren Gelenk des Spinnenbeins, also zwischen Metatarsus und Tibia, und erfasst dessen seitliche Auslenkung. Sie verändert sich relativ wenig, während die Spinne läuft, deshalb spricht der Rezeptor auf einen vergleichsweise schmalen Reizbereich an.

Auch beim Propriorezeptor sorgen Sensoren mit abgestufter Empfindlichkeit dafür, dass verschiedene Reizstärken verarbeitet werden können. Das hat die Natur durch unterschiedlich lange Schlitze des lyraförmigen Organs realisiert (siehe Bild S. 22). Der größte ist 200 Mikrometer lang und für Kompressionen der Cuticula zehnmal sensibler als der kürzeste, der nur 20 Mikrometer misst. Im vergangenen Jahr wiesen wir nach, dass bereits Schlitzkompressionen zwischen 1,4 und 30 Nanometern ausreichen, um die Propriorezeptoren zu reizen.

Welche Perfektion die Spinnen in mindestens 400 Millionen Jahren Evolution erreicht haben, lässt sich auch an den Materialeigenschaften ihrer Cuticula erkennen, die sich je nach Einsatz stark unterscheiden können. So filtert ein weiches cuticulares Polster zwischen dem Untergrund und den Vibrationssensoren biologisch unwichtige Signale weg – etwa Schwingungen, die von Blättern ausgehen, die im Wind schaukeln. Im Unterschied zum harten Außenskelett wirkt die Cuticula hier als viskoelastischer Stoßdämpfer, der nied-

Neutrinos doch nicht schneller als Licht

Ein Messfehler versetzte die Physiker monatelang in Aufregung.

Am 23. September 2011 trat das Team des Neutrinodetektors OPERA mit einer sensationellen Nachricht an die Öffentlichkeit. Das in Italien errichtete Instrument misst Neutrinos, die am Teilchenbeschleuniger SPS des Forschungszentrums CERN bei Genf erzeugt werden. Dabei hatten die OPERA-Forscher festgestellt, dass Myon-Neutrinos die etwa 731 Kilometer weite Reise durch die Erdkruste schneller als mit Lichtgeschwindigkeit (»superluminal«) zurücklegen.

Die Meldung traf in Fachkreisen meist auf ungläubiges Staunen. Denn seit Albert Einstein 1905 die spezielle Relativitätstheorie formulierte, gilt als unumstößliche Tatsache, dass sich kein Signal schneller ausbreiten kann als Licht im Vakuum. Auch sonst hatten die Forscher guten Grund für ihre Skepsis. Dass die Geschwindigkeitsobergrenze ebenso für Neutrinos gilt, war schon bei früheren Experimenten belegt worden. 1979 hatten Forscher am Fermilab bei Chicago Neutrinos (und Myonen) durch mehr als 500 Meter Stahl und Erde geschickt und keine Abweichung gefunden. Einen weiteren Hinweis lieferte die Supernova 1987A. Wären die OPERA-Daten korrekt, hätten erste Neutrinos bereits rund 4,2 Jahre vor dem ersten Lichtsignal auf der Erde eintreffen müssen – was nicht der Fall war. Denkbar schien allenfalls noch, dass die Neutrinogeschwindigkeiten stark von der Energie der Teilchen abhängen. Doch damit rechnet niemand ernsthaft.

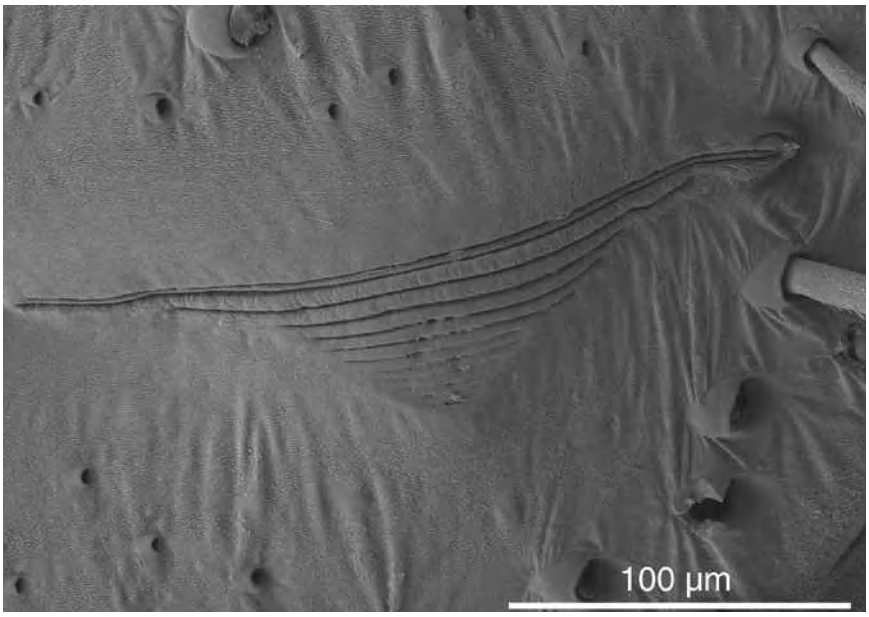
Gleichwohl war der Ehrgeiz einiger begabter Theoretiker geweckt. Binnen weniger Monate erschienen mehr als 150 Arbeiten online auf dem Preprint-Server arXiv. Vielleicht, so spekulierten die Forscher, breiten sich die Neutrinos ja durch zusätzliche Raumdimensionen aus und nehmen so gewissermaßen eine Abkürzung. Oder die drei bekannten Neutrinoarten bewegen sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Andrew Cohen und Nobelpreisträger Sheldon Glashow, beide von der Boston University, rechneten zudem vor, wie viel Energie superluminale Neutrinos durch die Erzeugung von Elektronen und Positronen verlieren würden.

Viele der Arbeiten konzentrierten sich aber auf die Suche nach denkbaren Messfehlern. Offenbar zu Recht, denn am 15. März hieß es plötzlich: falscher Alarm. Die OPERA-Forscher waren auf zwei mögliche Fehlerursachen gestoßen, deren Entdeckung bei einem so großen und komplexen Detektor akribische Kleinarbeit erfordert hatte. Insbesondere war der Lichtleiter nicht richtig gesteckt, der das externe GPS-Signal zu der in OPERA eingebauten Uhr transportiert. Dadurch wird das Zeitsignal verzögert, was eine kürzere Neutrinolaufzeit vortäuscht. Der zweite Effekt wirkt sich entgegengesetzt aus, hebt die Verzögerung des Zeitsignals aber nicht völlig auf.

Weil eine plausible Erklärung keine harten Messdaten ersetzt, sollen im Mai neben OPERA auch die ebenfalls im Gran-Sasso-Labor beheimateten Experimente Borexino, LVD und Icarus neue Laufzeitmessungen am Neutrinostrahl aus Genf vornehmen. Noch im März aber stellte das Icarus-Team Resultate vor (preprint 1203.3433), die auf sieben Neutrinoereignissen von Ende 2011 beruhen. Die Daten weisen darauf hin, dass sich die Teilchen mit Vakuumlichtgeschwindigkeit ausbreiten – ganz wie es sich gehört. Auch fanden die Icarus-Experimentatoren keine Belege für das von Cohen und Glashow berechnete Szenario.

Vorbehaltlich der Messungen im Mai lässt sich konstatieren: Trotz gründlichster Prüfungen hatten die OPERA-Kollegen am Ende leider doch zwei entscheidende Details übersehen. Wir können also aufatmen. Die Neutrinos scheinen die Überholspur verlassen zu haben und bewegen sich wieder mit Richtgeschwindigkeit.

Georg Wolschin ist Physiker und Wissenschaftsjournalist; er ist Professor an der Universität Heidelberg und forscht in theoretischer Physik.



CLEMENS SCHABER

Propriorezeptoren messen, wie stark sich das Außenskelett der Spinne verformt, während sie ihre Beine bewegt. Die rasterelektronenmikroskopische Aufnahme zeigt deutlich, dass die Schlitze dieser Rezeptoren unterschiedlich lang sind.

rige Frequenzen und geringe Geschwindigkeiten absorbiert, so dass sich das Nervensystem der Spinne erst gar nicht damit befassen muss. Diesen Effekt entdeckten wir bereits vor vier Jahren gemeinsam mit Materialwissenschaftlern um Vladimir Tsukruk vom Georgia Institute of Technology.

Zusätzlich verfügt die Spinne über feine Härchen, die so genannten Trichobothrien, die aus der Cuticula herausragen und winzigste Luftbewegungen registrieren. Sie bewegen sich so leicht, dass schon mechanische Reize mit einem Energiegehalt von wenigen trillionstel Joule genügen, um in ihren Sinneszellen ein Aktionspotenzial auszulösen. Das ist vergleichbar mit der Energie eines Lichtquants! Diese außerordentliche Empfindlichkeit ermöglicht es der Spinne, fliegende Insekten wahrzunehmen und zu orten – und zwar so präzise, dass sie eine Fliege in der Luft fangen kann. Eine derart detaillierte Anpassung der mechanischen Sinne an die Reizmuster, die für das Überleben der Spinne von Bedeutung sind, bringt auch erfahrene Biologen immer wieder zum Staunen über das Wunder Natur.

Clemens Schaber ist Biologe und arbeitet am Department für Neurobiologie der Universität Wien.

MATHEMATIK

Abelpreis für Endre Szemerédi

Die nach dem Vorbild des Nobelpreises gestaltete Auszeichnung geht dieses Jahr an den ungarisch-amerikanischen Forscher für seine bahnbrechenden Beiträge zur Kombinatorik und zur extremalen Graphentheorie.

VON CHRISTOPH PÖPPE

Kombinatorik – das ist doch diese Rechenübung mit dem Ziel, zu ermitteln, wie viele verschiedene Möglichkeiten es gibt, sechs Zahlen aus 49 für den Lottotipp auszuwählen oder 30 von 32 Karten an drei Skatspieler auszuteilen. Das Ergebnis ist immer eine sehr große Zahl – häufig weit mehr als die Anzahl der Atome im Universum –, und sie auszurechnen, ist entsprechend mühsam, aber nicht wirklich tiefsinnig.

Mit der Zuerkennung des diesjährigen – zehnten – Abelpreises zeichnet die zuständige Kommission nicht nur wie üblich einen großen Meister für sein Lebenswerk aus; sie lehrt uns nebenher auch, dass die genannte landläufige Sicht die Kombinatorik unterschätzt. Das unscheinbare Fach hat Ergebnisse von großer Bedeutung hervorgebracht, und Szemerédi war maßgeblich daran beteiligt.

Gleichwohl sind die Sätze der Kombinatorik vergleichsweise einfach zu formulieren und die Beweise elementar – was nicht mit »einfach« zu verwechseln ist. Wenn von einem Sachverhalt zu seiner Begründung ein weiter

KOSZTICSÁK SZILÁRD

Endre Szemerédi, geboren am 21. August 1940 in Budapest, studierte zunächst ein Jahr Medizin und arbeitete in einer Fabrik, bevor er sich der Mathematik zuwandte. Er schloss 1965 sein Studium in Budapest ab und promovierte 1970 in Moskau bei Israel Gelfand. Seit 1990 ist er Professor an der Rutgers University in New Brunswick (New Jersey); zugleich gehört er dem Alfréd-Rényi-Institut für Mathematik der ungarischen Akademie der Wissenschaften an.

Ein Minimum an Ordnung ist unvermeidlich – ein Kleinbeispiel

Es ist nicht möglich, die Menge der natürlichen Zahlen von 1 bis 9 so in zwei Teilmengen zu zerlegen, dass keine von ihnen eine arithmetische Progression der Länge 3 (»Dreierprogression«) enthält.

Anders ausgedrückt: Einerlei wie man die Zahlen von 1 bis 9 mit zwei Farben einfärbt – sagen wir rot und blau –, es gibt immer eine Dreierprogression von Zahlen gleicher Farbe.

Beweis: Wir zeigen, dass der Versuch, eine Färbung ohne eine solche Dreierprogression herzustellen, misslingen muss. Färben wir zuerst die Zahlen 1, 5 und 9. Sie dürfen nicht alle drei dieselbe Farbe bekommen, sonst wäre das schon eine Dreierprogression. Also müssen zum Beispiel 1 und 5 rot, 9 blau sein. Das erzwingt 3 blau, denn sonst gäbe es die rote Dreierprogression 1, 3, 5. Wegen 3 und 9 blau muss 6 rot sein, sonst droht 3, 6, 9 blau. 5 rot und 6 rot erzwingt 4 blau und 7 blau; 7 blau und 9 blau erzwingt 8 rot; 3 blau und 4 blau erzwingt 2 rot. Das ergibt unvermeidlich die rote Dreierprogression 2, 5, 8.

Alle anderen zulässigen Einfärbungen der Zahlen 1, 5 und 9 führen in ähnlicher Weise auf Widersprüche.

Die Zahl 9 ist übrigens die kleinste mit dieser Eigenschaft. Für die Zahlen von 1 bis 8 gibt es Zweifärbungen ohne einfarbige Dreierprogression, zum Beispiel:

gedanklicher Weg zurückzulegen ist, dann konstruieren die Mathematiker normalerweise – bildlich gesprochen – unter großem Aufwand ein Flugzeug, das sie einigermaßen komfortabel von *A* nach *B* bringt. Die Kombinatoriker gehen zu Fuß; aber die Entfernungen sind in ihrem Fach nicht unbedingt kürzer.

Viel Struktur bringen die Objekte der Kombinatorik nicht mit. Typischerweise sind es irgendwelche Dinge ohne Eigenschaften, von denen man nur weiß, zu welchen von ihresgleichen sie eine Beziehung haben. Was für eine Beziehung das ist, bleibt ebenfalls offen. Man nennt die Dinge Knoten, die Beziehungen zwischen ihnen Kanten und das Ganze einen Graphen. Die hübschen Diagramme der Graphentheorie machen uns glauben, die Knoten hätten einen bestimmten Platz im Raum – aber den gibt es nicht.

Selbst wenn sich ein Kombinatoriker mit den natürlichen Zahlen beschäftigt, legt er vielleicht keinen Wert auf die Tatsache, dass man sie multiplizieren kann, sondern begnügt sich mit der additiven Struktur. So ist es zu verstehen, wenn das Abelpreiskomitee explizit Szemerédis Beiträge zur »additiven Zahlentheorie« rühmt.

Kombinatoriker setzen nun ihren Ehrgeiz in den Nachweis, dass ein solcher strukturloser Haufen eben doch ein gewisses Minimum an Ordnung enthalten muss. Das klassische Beispiel stammt aus der Ramsey-Theorie: Auf jeder Party mit sechs (oder mehr) Teilnehmern gibt es mindestens drei Leute, die einander sämtlich bekannt oder sämtlich unbekannt sind. Für die abstrakte Formulierung ersetze man »Party« durch »Graph«, »Mensch« durch »Knoten« und »Bekanntschaft« durch »Kante«.

Während dieser Sachverhalt noch einigermaßen einfach zu beweisen ist, geraten die entsprechenden Probleme für größere Bekanntenzahlen rasch in den Bereich des Unlösbaren. Nach dem frühen Tod des Initiators Frank P. Ramsey (1903–1930) erzielte der legendäre Pál Erdős (1913–1996) bedeutende Fortschritte *(Spektrum der Wissenschaft 9/1990, S. 112–118)* – und übertrug seine Begeisterung auf seinen jungen Studenten Endre Szemerédi, dessen Talent er in Budapest entdeckt hatte. Der bewies 1975 eine lange offene Vermutung von Erdős und seinem Fachkollegen Pál Turán (1910–1976). Das Ergebnis heißt heute »Satz von Szemerédi«.

Ein strukturloser Haufen natürlicher Zahlen ist einfach eine beliebige Teilmenge derselben, und »Ordnung« in diesem Haufen ist hier zu verstehen als die Existenz einer »arithmetischen Progression« innerhalb dieser Teilmenge, das heißt von gewissen Zahlen, die alle im selben Abstand aufeinander folgen. 3, 7, 11, 15, 19 ist eine arithmetische Progression der Länge 5 mit Abstand 4, und 436, 521, 606, 691 ist eine der Länge 4 mit Abstand 85.

Erdős und Turán stellten sich die Frage, ob eine Teilmenge der natürlichen Zahlen arithmetische Progressionen beliebiger Länge enthält. Nennen wir eine solche Teilmenge »ordentlich«.

Eine Teilmenge, der zur Gesamtmenge nur endlich viele Zahlen fehlen, ist sicher ordentlich, eine endliche Teilmenge dagegen sicher nicht. Wenn man aber die natürlichen Zahlen in zwei, drei oder endlich viele unendliche Teilmengen zerlegt? Dann ist mindestens eine von ihnen ordentlich, so ein Satz, den Bartel Leendert van der Waerden 1926 bewies.

Der Satz von Szemerédi geht über dieses Resultat weit hinaus. Er besagt, dass eine Teilmenge nur »einen nennenswerten Prozentsatz aller natürlichen Zahlen« umfassen muss, um ordentlich zu sein; da man aber von einer unendlichen Menge keine Prozentsätze bilden kann, muss man erst definieren, was damit gemeint ist. Für eine endliche Zahl *N* kann man den Anteil der Zahlen von 1 bis *N*, die in unserer Teilmenge enthalten sind, bestimmen. Der Grenzwert dieser Zahl für *N* gegen unendlich heißt die »Dichte« der Teilmenge (die Definition ist erweiterbar auf den Fall, dass der Grenzwert nicht existiert). Wenn man nach dem Zufallsprinzip jeder natürlichen Zahl die Chance von einem Prozent gibt, dazuzugehören, hat die so erzeugte Menge eine Dichte von einem Prozent. Die geraden Zahlen haben die Dichte 1/2, aber die

Fliegen wie ein Vogel

Roboter können es mittlerweile.

Flattern Sie auch so viel im Schlaf? In meinen Flugträumen spüre ich wenig von der verkappten Libido, die laut Freuds Traumdeutung im Spiel sein soll. Immer muss ich heftig mit den Armen rudern und den Beinen strampeln, um nicht auf den Boden zu sacken, und komme nur mühsam voran. Völlig außer Atem wache ich auf.

Historisch sind alle Versuche, den alten Menschheitstraum zu verwirklichen, ähnlich frustrierend verlaufen. Wer es den Vögeln nachtun wollte wie der Schneider von Ulm oder Otto Lilienthal, der stürzte zu Tode – oder landete bestenfalls in der Donau. Erst mit Hilfe von festen Tragflächen und Propellerantrieb hüpften die Gebrüder Wright ein Stück durch die Luft.

Dennoch wurden immer wieder auch unbemannte Schwingflügler konstruiert, die das Vogelflattern kopieren sollten. Bis vor Kurzem machten sie eine noch schlechtere Figur als ich in meinen Träumen: Nach kurzem Gezappel plumpsten sie ins Gras. Aber auf einer Tagung in Edinburgh im Juli 2011 präsentierte der deutsche Forscher Markus Fischer eine täuschend naturgetreue Robotermöwe, deren Flugkunst Begeisterungsstürme auslöste (www.youtube.com/watch?v=Fg_JcKSHUtQ).

Der SmartBird ist nicht viel größer als eine ausgewachsene Möwe, aber nur halb so schwer. Er startet und landet auf einer ausgestreckten Menschenhand, dreht dazwischen ferngesteuert mehrere Runden durch den Saal und bewegt die Flügel ungemein naturgetreu. Dafür sorgt ein durchdachtes Getriebe im Rumpf, das leise surrend die Schwingen bei ihrem Auf und Ab so verdrillt, dass sie wie beim echten Vogel für optimalen Auf- und Vortrieb sorgen.

Die Theorie dahinter entwickelte Wolfgang Send vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Köln, der seit seiner Pensionierung die auf Automatisierungsaufgaben spezialisierte Firma Festo beim Bau des SmartBird beraten hat. Dessen größte Errungenschaft ist das aktive Verbiegen der Flügel bei jedem Schlag *(Science 335, S. 1430–1433, 2012)*.

Ein etwas kleinerer Schlagflügler namens Phoenix, der in den USA am Massachusetts Institute of Technology (MIT) entwickelt wurde, muss ohne aktives Verdrillen auskommen: Die weichen, nur an der Vorderkante versteiften Flügel deformieren sich passiv während des Schlagens. Das geht auf Kosten des aerodynamischen Wirkungsgrads: Der SmartBird erreicht 80, der Phoenix nur 30 Prozent. Darum ähnelt Phoenix eher einem rasch flatternden Insekt als einem Vogel (groups.csail.mit.edu/locomotion/videos.html).

Wozu sind solche Spielzeuge gut? Zum einen bringen sie die komplizierte Theorie des Vogelflugs voran, an der sich Forscher seit dem Ende des 19. Jahrhunderts die Zähne ausbeißen. Zum anderen ebnen sie den Weg zu Flugrobotern, die anders als herkömmliche Drohnen keine Start- und Landebahn brauchen und in geschlossenen Räumen mindestens so gut navigieren können wie kleine unbemannte Helikopter – insbesondere dort, wo Menschenleben in Gefahr sind. Kein Wunder, dass der MIT-Phoenix von der US-Marine finanziert wird.

Der größte Vorzug von Schlagflüglern ist, dass sie Luftströmungen zu ihrem Vorteil nutzen können. Adler oder Möwen segeln mit dem Rücken- oder Aufwind und sparen kostbare Energie. Denn wie beim Elektroauto ist der Akku die technische Schwachstelle der kleinen Flugroboter. Der SmartBird bleibt höchstens elf Minuten in der Luft. Eine natürliche Möwe segelt bei günstigem Wind dagegen bis zu 100 Kilometer weit. Dann lädt sie sich auf, indem sie einen Fisch fängt oder menschliche Essensabfälle plündert.

Michael Springer

Quadratzahlen und sogar die Primzahlen sind dünn gesät: Ihre Dichte ist null.

Szemerédi beweist seinen Satz, indem er zeigt, dass jeder Versuch, eine unordentliche Menge positiver Dichte herzustellen, scheitern muss. Zunächst ist nicht schwer zu beweisen, dass es unter den Zahlen von 1 bis N eine Teilmenge mit maximal vielen Elementen geben muss, die keine arithmetische Progression der Länge – zum Beispiel – 5 enthält. (Eine solche Menge anzugeben wäre allerdings überaus mühsam.) Szemerédi zeigt, dass diese Maximalzahl an Elementen geteilt durch N (die Dichte) für N gegen unendlich gegen null geht, und das nicht nur für Progressionen der Länge 5, sondern für beliebige Länge.

Der Beweis geht in der Tat »zu Fuß«, aber durch extrem schwieriges Gelände. Als wesentliches Hilfsmittel verwendet Szemerédi sein so genanntes Regularitätslemma für sehr große Graphen: Man kann deren Knoten derart in nicht allzu viele Eimer werfen, dass die von einem Eimer zu einem anderen verlaufenden Kanten sich einigermaßen gleichmäßig verteilen. Dieses Lemma hat in der Graphentheorie allgemein große Bedeutung gewonnen.

Der Satz von Szemerédi ist auch deswegen so schwer zu beweisen, weil die genannte Dichte zwar gegen null strebt, aber quälend langsam. Der Kehrwert der Dichte muss ja gegen unendlich streben, wenn N gegen unendlich geht, aber er tut das – jedenfalls soweit man das beweisen kann – nicht proportional zum Logarithmus von N, was schon sehr langsam ist, sondern zum Logarithmus vom Logarithmus von N, was die Qual noch potenziert.

In einem spektakulären Schritt bewiesen Ben Green und Terence Tao 2004, dass die Primzahlen ordentlich sind *(Spektrum der Wissenschaft 4/2005, S. 114–117)*. Da die Primzahlen eine dünne Menge sind, ist das nicht einfach eine Folgerung aus dem Satz von Szemerédi. Aber Green und Tao haben ihn bei ihrem Beweis verwendet.

Christoph Pöppe ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

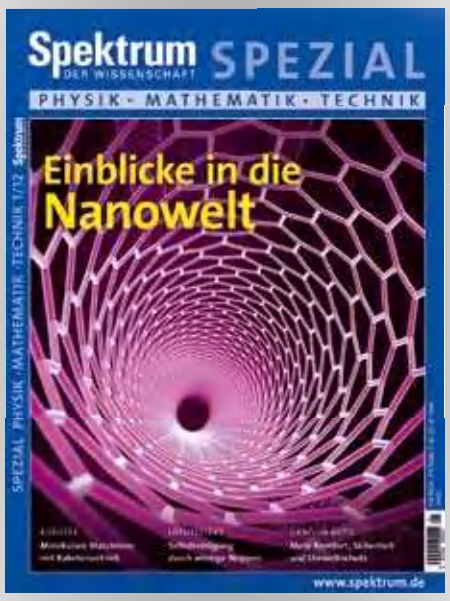
Thema Nanotechnologie bei Spektrum der Wissenschaft

Neu!

Als PDF direkt in Ihr Postfach

Lassen Sie sich schnell und kompakt über die wichtigsten Erkenntnisse im Bereich Nanotechnologie informieren! »Briefings Nanotechnology« erscheint monatlich digital und in englischer Sprache.

spektrum.com/briefings

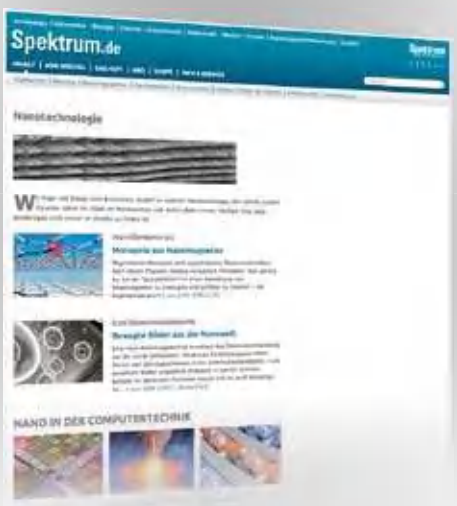


SPEKTRUM-SPEZIAL – PHYSIK • MATHEMATIK • TECHNIK 1/2012

»Einblicke in die Nanowelt«

Die Nanotechnologie ist unaufhaltsam auf dem Vormarsch und wird das 21. Jahrhundert prägen. Schon heute hat sie Eingang in unseren Alltag gefunden. Dieses »Spektrum-Spezial« bietet eine Sammlung wichtiger Artikel zum Thema Nanotechnologie aus »Spektrum der Wissenschaft«, die schlaglichtartig den aktuellen Stand und die Zukunft dieses Gebiets beleuchten – und wie es unser aller Leben beeinflussen wird.

spektrum.de/spezialabo



Themenseite »Nanotechnologie«

Hier finden Sie eine Zusammenstellung der wichtigsten Beiträge aus den Magazinen und Onlineberichten des Verlags rund um das Thema Nanotechnologie.

www.spektrum.de/nano

ADAM VOORHES PHOTOGRAPHY

TITELTHEMA: NEUROWISSENSCHAFT

Die Grenzen des Gehirns

Forscher bezweifeln, dass sich unsere Intelligenz noch wesentlich steigern könnte. Physikalische Gesetze verhindern dies.

Von Douglas Fox

Eine Honigbiene bewältigt mit ihrem nur rund ein Milligramm schweren Gehirn höchst anspruchsvolle Aufgaben – so kann sie sich ähnlich gut wie viele Säugetiere in der Umgebung zurechtfinden. Zwar ist die Leistungsfähigkeit ihres Minihirns durch die geringe Anzahl der Nervenzellen begrenzt, doch aus der verfügbaren neuronalen Kapazität scheint sie das Letzte herauszuholen.

Weit am anderen Ende der Skala befindet sich der Elefant mit seinem fünf Millionen Mal größeren Gehirn. Dessen Effizienz erinnert an die Bürokratie eines mesopotamischen Königreichs: Signale brauchen für den Weg zwischen den beiden Hirnhälften 100-mal länger; ähnlich sieht es mit der Reizleitung vom Gehirn zu den Füßen aus, so dass sich das Tier weniger auf seine Reflexe verlassen kann und daher schlicht und einfach langsamer geht. Ein Elefant muss also wertvolle neuronale Ressourcen dafür verschwenden, jeden einzelnen Schritt zu planen.

Ganz so schlimm sieht es bei uns Menschen nicht aus, und wir gelten mit einiger Berechtigung sogar als klügste Tierart auf der Erde – auch wenn es zugegebenermaßen schwierig ist, Intelligenz zu messen oder überhaupt erst einmal exakt zu definieren. Doch selbst unseren geistigen Fähigkeiten sind klare Grenzen gesetzt, obwohl gerade sie uns einen einzigartigen Vorteil gegenüber anderen Lebewesen verschaffen. Man könnte nun erwarten, dass der Evolutionsdruck die Anzahl der Nervenzellen in unseren Gehirnen oder die Geschwindigkeit der Signalübertragung zwischen den Neuronen fortwährend erhöht – und dass uns solche Veränderungen auch tatsächlich immer klüger machen.

Vielleicht ist unser Gehirn aber bereits am Limit seiner informationsverarbeitenden Fähigkeiten angelangt? Anthropologen rätseln schon lange, ob bestimmte anatomische Voraussetzungen ein weiteres Wachstum des menschlichen Denkapparats verhindern: ob zum Beispiel ein größeres Gehirn in einem entsprechend größeren Schädel überhaupt durch den Geburtskanal einer Frau passen würde, denn ihre Beckenform ist durch den aufrechten Gang bestimmt. Vermutlich hätte jedoch die Evolution dieses Problem lösen können, vielleicht durch einen früheren Geburtszeitpunkt, weshalb es tiefere Gründe für die Grenzen des Hirnwachstums geben dürfte. Neuere Forschungsergebnisse weisen nun darauf hin, dass bestimmte physikalische Faktoren der Evolution von Intelligenz, die auf Neuronennetzen basiert, klare Grenzen setzen – und dies nicht nur beim Menschen, sondern bei allen Tieren.

Ein größeres Gehirn wäre wohl wirklich die offensichtlichste Möglichkeit, die Denkleistung zu verbessern. Mehr Neurone könnten seine Komplexität erhöhen. Tatsächlich fasziniert der Zusammenhang von Hirngröße und Intelligenz Wissenschaftler seit mehr als 100 Jahren. Im späten 19. und frühen 20. Jahrhundert suchten Biologen nach allgemein gültigen Gesetzen des Lebens und dabei auch nach mathematischen Formeln, die den Zusammenhang von Körpermasse und Hirnvolumen im Tierreich beschreiben.

Doch schon damals war klar, dass die Gehirngröße allein kein Maßstab für Intelligenz sein kann: Das Hirn einer Kuh ist 800-mal größer als das einer Maus, und dennoch ist sie wohl nicht wirklich klüger. Es sieht eher so aus, als ob Gehirne zwangsläufig mit der Körpermasse wachsen. Größere Tiere scheinen umfangreichere neuronale Netze für »Haushaltsarbeiten« abstellen zu müssen. Es gilt zum Beispiel mehr Signale von Tastrezeptoren in der Haut und von der ausgedehnteren Netzhaut zu verarbeiten sowie mehr Muskelfasern zu koordinieren.

Der holländische Anatom Eugène Dubois (1858–1940), der 1893 auf Java den Schädel des *Homo erectus* entdeckte, suchte nach einem Weg, die Intelligenz von Tieren auf Grundlage der Maße ihrer Schädel abzuschätzen. Dazu wollte er das Verhältnis zwischen Gehirn- und Körpergröße der jeweiligen Arten mathematisch präzise beschreiben. Er ging dabei davon aus, dass Tiere mit – im Vergleich zu ihrem Körpergewicht – überdurchschnittlich großen Hirnen auch besonders klug seien. Dubois und andere Wissenschaftler trugen eine beachtliche Datenmenge zusammen: Eine ihrer Abhandlungen umfasste etwa Angaben zum Gewicht von Körper, Organen und Drüsen von insgesamt 3690 Tierarten – von Waldkakerlaken über Gelbschnabelreiher bis zum Zwei- und Dreifingerfaultier.

Dubois' Nachfolger fanden dann heraus, dass das Gehirngewicht bei Säugern nur mit dem Körpergewicht hoch 3/4 zunimmt, also weniger als proportional. So hat eine Bisamratte, deren Körper etwa 16-mal schwerer ist als der einer Maus, ein ungefähr achtmal größeres Gehirn. Damit war der gesuchte mathematische Zusammenhang gefunden: der Enzephalisationsquotient (EQ), der die tatsächliche Hirnmasse einer Tierart mit der auf Grund des Körpergewichts zu erwartenden vergleicht. Der EQ gibt also an, in welchem Maß eine Spezies von der Regel mit dem Exponenten 3/4 abweicht.

Beim Menschen beträgt der EQ 7,5 (unser Gehirn ist 7,5-mal größer, als es die Formel vorhersagt), beim Großen Tümmler 5,3. Affen erreichen 4,8 und Rinder wenig überraschend nur 0,5 (siehe Kasten rechts). Intelligenz hängt also möglicherweise davon ab, wie viel neuronale Reserven übrig bleiben, wenn die grundlegenden Aufgaben des Gehirns, etwa Reaktionen auf Berührungen der Haut, abgedeckt sind. Die Hirngröße spielt somit durchaus eine Rolle – zumindest oberflächlich betrachtet.

Das berühmt-berüchtigte »law of diminishing returns«

Säugetiere und Vögel profitierten in ihrer Entwicklung sicherlich von zunehmender Hirnmasse. Zum Beispiel: Je größer die Anzahl der möglichen Wege, die ein Signal zu nehmen vermag, desto höher ist sein Informationsgehalt. Die Nervenzellen müssen nun für das gleiche Resultat weniger häufig feuern. Doch lässt sich die Intelligenz nicht unbegrenzt durch fortwährend anwachsende Neuronenzahl steigern. »Ich halte es für ziemlich wahrscheinlich, dass hier das ›law of diminishing returns‹ (Gesetz der abnehmenden Erträge) zum Tragen kommt«, erklärt der Physiker Vijay Balasubramanian, der an der University of Pennsylvania in Philadelphia über die neuronale Verschlüsselung von Informationen forscht. Eine größere Zahl an Zellen bedeutet ja auch eine höhere Belastung, etwa durch zusätzlichen Energieverbrauch.

Beim Menschen ist das Gehirn das Organ mit dem höchsten Energiebedarf. Bei nur zwei Prozent des Körpergewichts beansprucht es immerhin 20 Prozent der in Ruhe verbrauchten Kalorien – bei Neugeborenen sind es sogar 65 Prozent. Einen Großteil der benötigten Energie verwendet das Gehirn für die Kommunikation in seinen neuronalen Netzen. In der menschlichen Großhirnrinde entfallen darauf etwa 80 Prozent des Verbrauchs. Doch mit zunehmender Größe wird die neuronale Vernetzung auch aus weniger offensichtlichen, strukturellen Gründen schwieriger.

Schon als die Biologen noch Daten zum Hirngewicht sammelten, beschäftigten sie sich nebenbei mit einer viel anspruchsvolleren Frage: der nach den Konstruktionsprinzipien des Gehirns – und inwieweit diese bei verschiedenen Hirngrößen beibehalten werden. Ein typisches Neuron hat einen langen Fortsatz zum Versenden von Signalen: das Axon, das sich an seinem Ende verzweigt und über Synapsen mit anderen Nervenzellen Kontakt aufnimmt (siehe Kasten S. 31). Axone verbinden wie Telegrafenkabel verschiedene Hirnregionen oder verlaufen – zu Nerven gebündelt – vom Gehirn zu anderen Teilen des Körpers.

In diesen frühen Studien vermaßen die Biologen unter dem Mikroskop den Durchmesser von Axonen, bestimmten

AUF EINEN BLICK

EVOLUTION AM ANSCHLAG

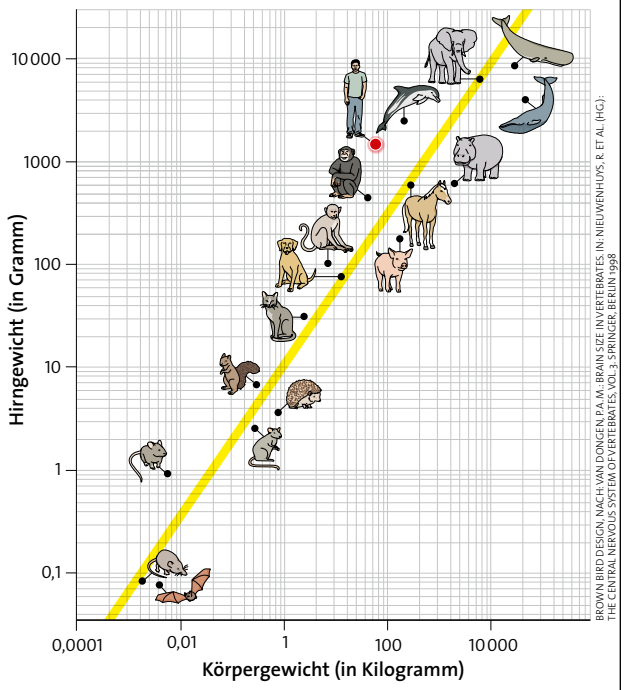
1 Die **menschliche Intelligenz** scheint sich bereits an ihrem evolutionär möglichen Maximum zu befinden. Dafür sprechen Forschungsergebnisse der letzten Jahre, denen zufolge **physikalische Gesetze** eine wesentliche Leistungssteigerung verhindern.

2 Eine höhere Hirnleistung durch Vergrößerung des Gehirns würde zu viel **Energie** verbrauchen und die neuronalen Prozesse verlangsamen, da größere Strecken zu überwinden wären. Auch würden die Verbindungen zwischen den Nervenzellen übermäßig viel **Platz** beanspruchen.

3 Diese Nachteile ließen sich theoretisch durch die Evolution kleinerer Nervenzellen und dünnerer Axone ausgleichen, doch dem stehen dieselben **thermodynamischen Gesetze** entgegen, die auch die Verkleinerung der Schaltelemente in Computerchips begrenzen: Unterhalb einer bestimmten Größe nimmt das **zufällige Signalrauschen** überhand und verhindert eine effektive Informationsübermittlung.

Abweichler beim Hirngewicht

Große Tiere haben auch größere Gehirne. Deren Masse nimmt jedoch nicht direkt proportional zum Körpergewicht zu, sondern zu diesem hoch 3/4. In der doppelt logarithmischen Skala des Diagramms drückt sich das als gerade Linie geringer Steigung aus. Besonders intelligente Tiere weichen von dieser Regel aber ab: Sie liegen oberhalb der Linie. Der Mensch etwa übertrifft den von der Formel vorausgesagten Wert um den Faktor 7,5 und ist damit der Spitzenreiter unter allen Tierarten. Ab einem bestimmten Punkt bringt eine weitere Vergrößerung des Gehirns immer weniger Zugewinn an Leistung (siehe Kasten S. 32).



die Größe und Dichte der Zellen und die Anzahl der Synapsen pro Neuron. Sie untersuchten in den Gehirnen von Dutzenden verschiedener Tierarten hunderte, manchmal tausende Nervenzellen. Um ihre mathematischen Formeln zu verfeinern und dazu möglichst große Tiere einzubeziehen, entnahmen sie sogar Walkadavern das gesamte Gehirn. Der norwegische Biologe Gustav Adolf Guldberg (1854–1908) beschrieb in den 1880er Jahren die fünfstündige Prozedur, in der zwei Männer mit einer großen Holzfällersäge, Axt, Meißel und viel Muskelkraft den Schädel eines toten Wals wie den Deckel einer Konservenbüchse öffneten.

Diese Untersuchungen zeigten, dass bei den verschiedenen Spezies mit zunehmender Hirnmasse allmählich Veränderungen auftreten, die aber wohl nicht beliebig extrapolierbar sind. So werden die Nervenzellen im Durchschnitt größer. Dadurch können sie bei steigender Gesamtzahl zu immer mehr anderen Neuronen Kontakt aufnehmen, weil sie den nötigen Platz für zusätzliche Synapsen bieten. Allerdings lassen sich größere Zellen in der Hirnrinde weniger dicht packen, so dass auch die Entfernung zwischen den Neuronen und damit die Länge der Axone zunimmt. Und da das wiederum die Signalübertragungszeit erhöht, müssen die Zellausläufer zum Ausgleich dicker werden – denn die Leitungsgeschwindigkeit wächst mit dem Durchmesser.

Zudem unterteilen sich die Gehirne mit zunehmender Größe in immer mehr abgrenzbare Areale. Diese Kompartimente lassen sich erkennen, wenn man das Gewebe anfärbt und unter dem Mikroskop betrachtet, denn sie nehmen die Farbstoffe unterschiedlich stark an. Sie entsprechen oft auch funktionellen Einheiten, etwa für Sprachverständnis oder Gesichtserkennung. Mit weiter steigender Gehirngröße erfolgt noch in einer anderen Dimension eine Spezialisierung: Anatomisch vergleichbare Areale in der linken und rechten Hirnhälfte übernehmen tendenziell unterschiedliche Aufgaben, zum Beispiel einerseits räumliches und andererseits sprachliches Denken.

Spezialisierung – ein Zeichen höherer Intelligenz?

Jahrzehntelang galt eine derartige Unterteilung des Gehirns als offensichtliches Anzeichen für höhere Intelligenz. Es könnte aber auch profanere Erklärungen dafür geben, hält Mark Changizi dagegen, ein theoretischer Neurobiologe bei 2AI Labs in Boise, US-Bundesstaat Idaho: Die Spezialisierung der Areale beseitige lediglich ein grundlegendes Problem der Verknüpfung zwischen Nervenzellen, das mit steigender Hirngröße auftritt. Denn je mehr Neurone ein Gehirn enthält, desto schwieriger wird es, den gleichen Vernetzungsgrad aufrechtzuerhalten. Die Lösung besteht darin, Neurone mit ähnlichen Funktionen zu Einheiten zusammenzufassen, die jeweils in sich hoch vernetzt sind, aber untereinander nur mit deutlich weniger und dafür langen Axonen Kontakt halten. Auch die Spezialisierung der rechten und linken Hirnhälfte dient einem solchen Zweck: Dadurch müssen weniger Informationen von einer Seite zur anderen gelangen, und das Gehirn benötigt entsprechend weniger Axone, um die beiden Hemisphären zu verbinden. »All die anscheinend komplexen Organisationsprinzipien in größeren Gehirnen sollen letztlich nur das Vernetzungsproblem lösen«, argumentiert Changizi, »und sind nicht unbedingt Hinweise auf höhere Intelligenz.«

Jan Karbowski, Neuroinformatiker an der Polnischen Akademie der Wissenschaften in Warschau, teilt diese Auffassung. »Das Gehirn muss mehrere Parameter gleichzeitig optimieren, und das geht nur mit Kompromissen«, sagt er. »Verbessert man nur einen Aspekt, vermasselt man einen anderen.« Was würde etwa geschehen, wenn der Balken (das Axonbündel, das rechte und linke Hirnhälfte verbindet) bei steigender Hirngröße so viel dicker wird, dass der Vernetzungsgrad zwischen rechts und links gleich bleibt? Und wenn zudem der Querschnitt der Axone so anwächst, dass die Signale zwischen den Hirnhälften nicht langsamer laufen? Als Ergebnis würde der Balken stark anschwellen und die Hirnhälften dadurch auseinanderdrängen. Damit wären

die denkbaren Verbesserungen der Hirnfunktion dank der Vergrößerung gleich wieder zunichtegemacht.

Derlei Kompromisse treten bei Experimenten, die den Zusammenhang von Axonquerschnitt und Signalleitgeschwindigkeit demonstrieren, deutlich zu Tage. Wie Karbowski zusammenfasst, vergrößern sich die Neurone zwar mit zunehmender Masse des Gehirns, jedoch nicht genug, um gleich gut vernetzt zu bleiben. Ebenso werden die Axone mit steigendem Hirngewicht dicker – aber eben nicht so sehr, dass es die Signalverzögerungen durch die längeren Leitungen ausgleichen würde. Das wäre auch nicht effizient. Denn während ein doppelter Axonquerschnitt den Energieverbrauch ebenfalls verdoppelt, steigt die Übertragungsgeschwindigkeit gleichzeitig nur um etwa 40 Prozent.

Grundsätzlich nimmt aber trotzdem mit steigender Hirnmasse die weiße Substanz (Axone) rascher zu als die graue Substanz (Zellkörper der Neurone). Tiere mit größerem Gehirn müssen also anteilmäßig mehr Hirnvolumen für die Verdrahtung reservieren als für die Zellen, welche die eigentliche Rechenarbeit leisten. Eine weitere Vergrößerung dürfte demnach irgendwann nicht mehr die Leistung verbessern.

Wie lässt sich das Problem lösen? Als Jon H. Kaas, Neurobiologe an der Vanderbilt University in Nashville, und seine Kollegen 2007 die Hirnzellen verschiedener Primaten miteinander verglichen, stießen sie auf eine Besonderheit, die uns Menschen vermutlich einen erheblichen Vorteil verschafft. Kaas stellte nämlich fest, dass bei Primaten die meisten Neurone in der Hirnrinde – im Gegensatz zu anderen Tieren – mit steigendem Hirnvolumen kaum an Umfang zulegen. Nur ein kleiner Teil der Zellen wird größer, und diese wenigen scheinen für die Verbindung der verschiedenen Hirnareale verantwortlich zu sein.

Daher ist die Neuronendichte bei Primatenspezies mit deutlich verschiedenem Hirnvolumen ziemlich konstant. Nachtaffen haben ein etwa doppelt so großes Gehirn wie die deutlich kleineren Seidenäffchen und auch eine doppelt so hohe Zahl von Nervenzellen. Bei Nagern dagegen nimmt die Neuronenzahl für ein zweifaches Hirnvolumen lediglich um 60 Prozent zu. Dieser Unterschied hat erhebliche Konsequenzen. Menschen verfügen bei 1,4 Kilogramm Hirngewicht über 100 Milliarden Neurone. Das Gehirn eines Nagetiers mit ebenso vielen Nervenzellen wäre hingegen 45 Kilogramm schwer! Und dieses riesige Organ würde sämtliche verfügbare Stoffwechselenergie verbrauchen. »Das dürfte einer der Gründe sein, weshalb die großen Nagerarten nicht schlauer sind als die kleinen«, erklärt Kaas.

Tatsächlich scheint ein Gehirn höhere Leistungen erbringen zu können, wenn es aus kleineren und dichter gepackten Neuronen aufgebaut ist. Im Jahr 2005 beschrieb der Neurobiologe Gerhard Roth von der Universität Bremen einige Parameter, die bei unterschiedlichen Tierarten noch deutlicher mit höherer Intelligenz – sprich komplexerem Verhalten – verknüpft sind als der Enzephalisationsquotient: »Die einzigen eindeutigen Korrelationen«, so Roth, »finden sich bei der Neuronenzahl in der Großhirnrinde sowie bei der Geschwindigkeit der neuronalen Aktivität.« Letztere sinkt mit zunehmendem Abstand zwischen den Neuronen und steigt mit dem Ausmaß der so genannten Myelinisierung. Myelin ist das Material der Isolierschicht um die Axone, die eine viel schnellere Signalübertragung erlaubt.

Damit würde sich die geringe Größe der Primatenneurone doppelt positiv auswirken: Ihre Zahl kann mit der Hirngröße stärker zunehmen, und die Zellen können schneller kommunizieren, da sie näher beieinanderliegen. Elefanten und Wale sind zwar ziemlich intelligent, doch die Größe ihrer Nervenzellen und des Hirnvolumens beeinträchtigen die neuronale Effizienz. »Die Packungsdichte der Zellen ist bei diesen Tieren wesentlich geringer«, erläutert Roth. »Das bedeutet einen größeren Abstand zwischen den Neuronen und damit eine deutlich langsamere Signalübertragung.«

Schnelle und direkte Verbindungen zwischen Hirnarealen fördern die Denkfähigkeit

Neurowissenschaftler haben mittlerweile ähnliche Zusammenhänge auch zwischen verschiedenen Menschen entdeckt. Jene mit der schnellsten Signalübertragung zwischen den Hirnarealen sind offenbar am intelligentesten. Martijn P. van den Heuvel vom Medizinischen Zentrum der Universität Utrecht untersuchte mit seinem Team 2009 mittels funktioneller Kernspintomografie, wie direkt die verschiedenen Hirnregionen bei einzelnen Personen miteinander kommunizieren, das heißt, wie viele Areale jeweils dazwischengeschaltet sind. Demnach gehen kürzere Wege mit einem höheren Intelligenzquotienten einher. Ähnliche Ergebnisse gewann im selben Jahr eine Forschungsgruppe unter der Leitung des Neurowissenschaftlers Edward Bullmore von der University of Cambridge, jedoch mit einem anderen Ansatz. Das Team verglich zunächst das Arbeitsgedächtnis von 29 gesunden Probanden anhand dessen, wie gut sie sich mehrere Zahlen gleichzeitig merken konnten. Dann schätzten sie mit Hilfe magnetenzephalografischer Ableitungen an der Kopfhaut die Übertragungsgeschwindigkeit zwischen den Hirnarealen. Resultat: Die Probanden mit der direktesten und schnellsten neuronalen Kommunikation verfügten auch über das beste Arbeitsgedächtnis.

Das ist eine entscheidende Erkenntnis. An sich sparen ja größere Gehirne Platz und Energie, indem sie die direkten Verbindungen zwischen den verschiedenen Arealen reduzieren. Das menschliche Denkorgan weist tatsächlich relativ wenige solche langen Verknüpfungen auf. Doch laut Bullmore und van den Heuvel sind diese seltenen direkten Verbindungen trotzdem äußerst bedeutsam für die Intelligenz: Wenn auch nur einige zu viel davon eingespart werden, sinkt die Leistungsfähigkeit rapide. »Intelligenz hat ihren Preis«, stellt Bullmore fest. »Die Zahl der Verbindungen innerhalb des Gehirns lässt sich nicht einfach immer weiter verringern.«

Falls also tatsächlich der neuronale Signaltransport die Intelligenz begrenzt, gäbe es theoretisch zwei elegante Auswege für die weitere Evolution. So sollte die Entwicklung kleinerer Nervenzellen – die näher zusammenrücken und schnel-

ler kommunizieren können – leistungsfähigere Gehirne ermöglichen. Und auch verbesserte Axone, die Informationen rascher leiten, ohne dass ihr Querschnitt zunimmt, könnten die Hirnleistung steigern. Doch ein wichtiger Faktor verhindert eine Miniaturisierung von Neuronen und Axonen unter eine bestimmte Grenze: Die Ionenkanäle, mit denen die Zellen ihre elektrischen Signalimpulse erzeugen, funktionieren nicht besonders präzise.

Ionenkanäle sind Proteine in der Zellmembran, die wie winzige Ventile arbeiten. Sie öffnen und schließen sich durch Veränderungen ihrer Form. Im offenen Zustand lassen sie Natrium-, Kalium- oder Kalziumionen durch die Zellmembran passieren und erzeugen so jene elektrischen Signale, mit denen Neurone untereinander kommunizieren. Doch da sie so klein sind, können bereits rein durch Wärme bewirkte Eigenbewegungen der Moleküle solche Vorgänge auslösen. Ein Verfahren namens Patch-clamp-Technik illustriert dieses Problem: Forscher können einen einzelnen Ionenkanal isolieren und seine elektrischen Eigenschaften messen, indem sie ein mikroskopisch feines Glasröhrchen auf der Membran aufsetzen – so wie man eine Ameise einsperren kann, indem man ein Glas darüberstülpt. Verändern sie dann die elektrische Spannung am Ionenkanal, um ihn zu öffnen oder zu schließen, reagiert er beileibe nicht so vorhersehbar wie etwa ein Lichtschalter. Stattdessen klappt er mitunter scheinbar zufällig auf und zu. Manchmal öffnet er sich gar nicht, und manchmal tut er es grundlos. Denn die veränderte Spannung beeinflusst nur die Wahrscheinlichkeit, dass sich der Kanal öffnet.

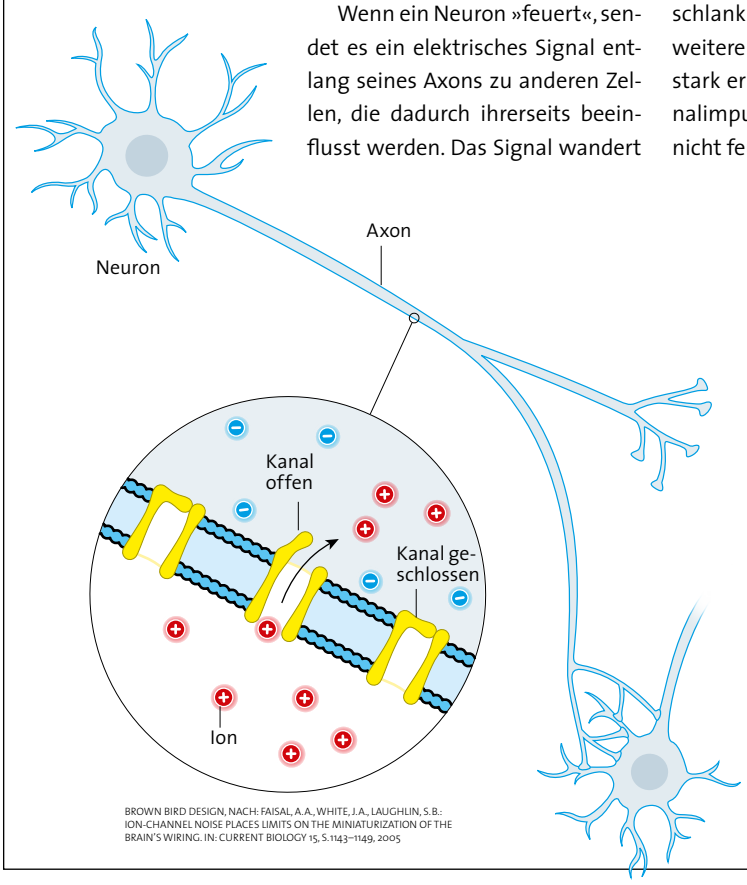
Das klingt nach einem schweren evolutionären Konstruktionsfehler – in Wirklichkeit ist es aber ein notwendiger Kompromiss. »Wenn die Rückstellfeder am Kanal zu weich eingestellt ist, wird er von Zufallseinflüssen gesteuert«, erklärt Simon Laughlin, theoretischer Neurowissenschaftler an der University of Cambridge. »Ist sie zu hart, nimmt das Rauschen ab, doch es braucht dann einen höheren Aufwand, um den Kanal zu schalten.« Anders ausgedrückt: Die Neurone

Die Grenzen der Miniaturisierung

Genau wie schrumpfende Transistoren die Rechengeschwindigkeit von Computern erhöhen, könnten Gehirne mit mehr und kleineren Zellen bessere Leistungen erzielen. Menschliche Neurone und insbesondere ihre langen »Kabel«, die Axone, sind jedoch vermutlich in puncto Miniaturisierung bereits nahe an der Grenze der physikalischen Möglichkeiten angelangt.

Wenn ein Neuron »feuert«, sendet es ein elektrisches Signal entlang seines Axons zu anderen Zellen, die dadurch ihrerseits beeinflusst werden. Das Signal wandert am Axon entlang, indem es Ionenkanäle in der Zellmembran öffnet. Wenn genügend Ionen durch den Kanal fließen, ändert dies das elektrische Potenzial der Membran, was in einer Art Dominoeffekt weitere Kanäle öffnet.

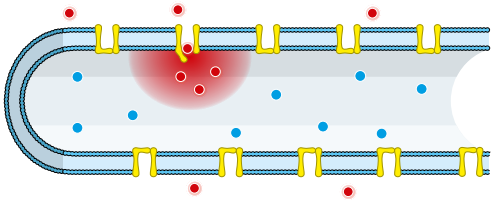
Dünnere Axone würden Platz sparen und weniger Energie verbrauchen. Die Evolution hat die Axone jedoch schon fast so schlank gemacht, wie es mit ihrer Funktion vereinbar ist. Eine weitere Abnahme des Durchmessers würde das Signalrauschen stark erhöhen: Die Axone würden zu viele zufallsbedingte Signalimpulse erzeugen, auch wenn das Neuron eigentlich gar nicht feuern soll.



BROWN BIRD DESIGN, NACH: FAISAL, A.A., WHITE, J.A., LAUGHLIN, S.B.: ION-CHANNEL NOISE PLACES LIMITS ON THE MINIATURIZATION OF THE BRAIN'S WIRING. IN: CURRENT BIOLOGY 15, S.1143–1149, 2005

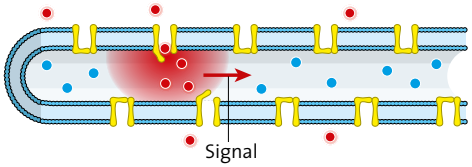
ZUFALLSFLACKERN OHNE FOLGEN

Öffnet sich ein einzelner Ionenkanal in einem normalen Axon zufällig, schließt er sich wieder, bevor dies Auswirkungen hat.



UNBEABSICHTIGTE SIGNALKASKADE

In einem dünneren Axon steigt die Wahrscheinlichkeit, dass ein einzelner, zufällig geöffneter Ionenkanal auch benachbarte Kanäle öffnet und damit eine Kettenreaktion auslöst.

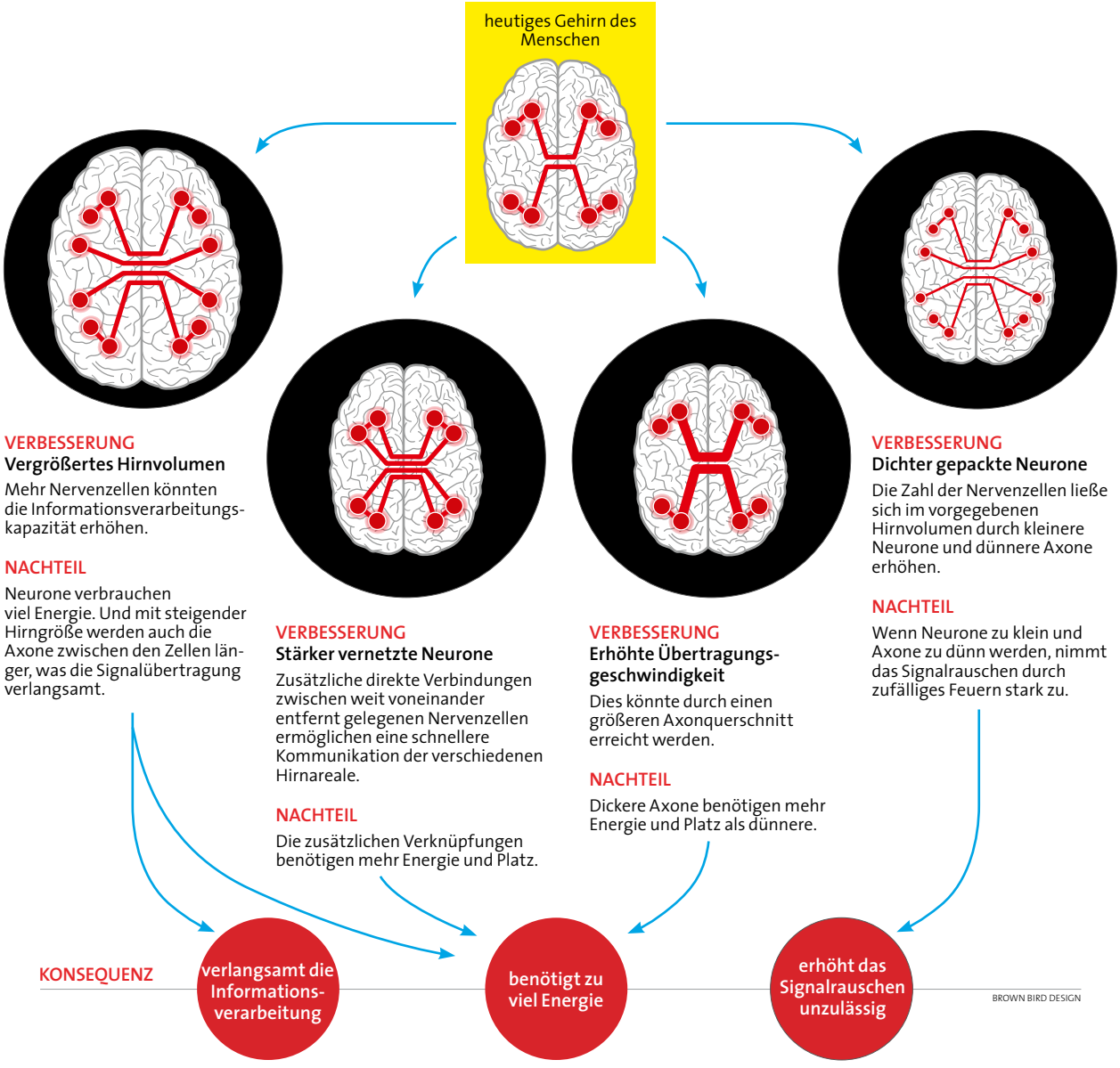


sparen Energie, indem sie leichtgängige Schalter verwenden, doch das führt dazu, dass sich die Kanäle auch zufällig öffnen und schließen. Ionenkanäle arbeiten deshalb nur dann zuverlässig, wenn eine größere Anzahl davon wie bei einer Volksabstimmung entscheidet, ob das Neuron auf einen Reiz hin ein Signal erzeugen soll oder nicht. Dieser Prozess wird umso fehleranfälliger, je kleiner das Neuron ist. »Mit der Neuronengröße nimmt auch die Anzahl der Kanäle ab, die zur Verfügung stehen«, sagt Laughlin, »und damit wächst das Rauschen.«

In zwei Untersuchungen berechneten der Forscher und seine Mitarbeiter 2005 und 2007, inwieweit die benötigte Mindestanzahl von Ionenkanälen die Miniaturisierung der Axone begrenzt. Die Ergebnisse waren eindeutig: »Sinkt der Axondurchmesser unter 150 bis 200 Nanometer, wird das Rauschen zu hoch«, berichtet Laughlin. Dann enthält ein Axon so wenige Ionenkanäle, dass schon das zufällige Öffnen eines einzelnen davon ein Signal auslösen kann, obwohl das Neuron eigentlich gar nicht feuern sollte (siehe Kasten S. 31).

Weshalb wir vermutlich nicht viel schlauer werden können

Theoretisch ließe sich unsere Intelligenz auf mehreren evolutionären Wegen weiter steigern. Sie alle bringen jedoch Nachteile mit sich und stoßen rasch an thermodynamische Grenzen. Vielleicht sind wir daher schon annähernd so intelligent, wie wir mit einem Denkorgan überhaupt werden können, das auf Neuronen basiert.



Tatsächlich erzeugen die dünnsten Axone des menschlichen Gehirns bereits etwa sechs solcher zufallsbedingten Aktionspotenziale pro Sekunde. Eine nur geringfügige weitere Verkleinerung würde schnell zu mehr als 100 Zufallspotenzialen pro Sekunde führen. Die Axone unserer Hirnrinde arbeiten also bereits nahe am Limit.

Dieser Kompromiss zwischen Information, Energie und Rauschen findet sich nicht nur in der Biologie. Er gilt auch für technische Apparate wie Glasfaserkabel, Funkgeräte und Computerchips. Wie die Ionenkanäle im Nervensystem dienen die Transistoren in der Elektronik als Schalter für elektrische Signale. Über 50 Jahre lang haben Ingenieure stets kleinere Transistorelemente in immer größerer Anzahl auf Siliziumchips untergebracht und so immer schnellere Computer konstruiert. Die aktuelle Generation der Schaltelemente misst nur noch 22 Nanometer. Da wird es bereits sehr schwierig, Silizium gleichmäßig mit geringen Mengen anderer Elemente zu »dotieren«, wie es für Halbleitertransistoren nötig ist. Bei einer Größe von etwa zehn Nanometern wird schon die An- oder Abwesenheit eines einzelnen Fremdatoms unvorhersehbares Verhalten hervorrufen können.

Die Evolution fängt nicht wieder von vorn an

Möglicherweise werden die Ingenieure dieses Problem lösen, indem sie Computerchips mit Hilfe anderer Technologien von Grund auf neu entwickeln. Doch die Evolution kann nicht einfach von vorn anfangen: Sie muss mit den seit mindestens einer halben Milliarde Jahren existierenden Prinzipien und Bauelementen von Nervensystemen weiterarbeiten, erläutert der Entwicklungsbiologe Heinrich Reichert von der Universität Basel. Ein komplett neues Gehirn zu entwickeln, wäre so, als wollte man aus Flugzeugteilen ein Kriegsschiff bauen.

Es gibt noch einen weiteren Grund zu bezweifeln, dass ein Evolutionssprung zu wesentlich intelligenteren Gehirnen führen könnte. Als die ersten Neurone entstanden, mag ihnen eine ganze Reihe von Entwicklungsmöglichkeiten offengestanden haben. Doch heute, über 600 Millionen Jahre später, zeigt sich bei näherer Betrachtung: Obwohl sich die Gehirne von Bienen, Tintenfischen, Krähen und Affen auf den ersten Blick kaum ähneln, weisen die neuronalen Netze, die den Hirnfunktionen wie Sehen, Riechen, episodischem Gedächtnis und Navigation zu Grunde liegen, dieselben grundlegenden Eigenschaften auf. Eine solche evolutionäre Konvergenz bedeutet in der Regel, dass eine anatomische oder physiologische Lösung ausgereift ist und damit wenig Verbesserungsmöglichkeiten bleiben.

Vielleicht hat das Leben also bereits einen optimalen neuronalen Bauplan entwickelt, der evolutionär fest verwurzelt ist. Kann das menschliche Gehirn demnach gar nicht mehr komplexer und leistungsfähiger werden? Laughlin glaubt hier nicht an eine starre Obergrenze, vergleichbar etwa mit der Lichtgeschwindigkeit in der Physik. »Es ist eher so, dass vermehrter Aufwand immer weniger zusätzliche Hirnleistung erbringt«, erläutert er. »Weitere Investitionen lohnen sich also kaum noch.« Das Gehirn kann nur eine bestimmte Anzahl Neurone sinnvoll unterbringen, diese können nur eine begrenzte Zahl an Verbindungen herstellen, und auch die Menge der pro Sekunde übertragenen elektrischen Impulse lässt sich nicht endlos steigern. Zudem wächst der Energieverbrauch mit zunehmender Größe des Gehirns und des Körpers, die Wärmeabfuhr wird schwieriger, und die Signalübertragung von einem Hirnareal ins andere dauert länger.

Vielleicht aber kann das menschliche Gehirn auch ohne fortgesetzte biologische Weiterentwicklung noch leistungsfähiger werden. Honigbienen und anderen sozialen Insekten gelingt das jedenfalls: Sie schaffen durch Kooperation mit ihren Geschwistern im Stock ein Kollektiv, das klüger ist als das Individuum. Auch Menschen vereinen bei Gemeinschaftsunternehmungen die intellektuellen Fähigkeiten der Einzelnen und erzielen damit höhere Leistungen.

Zudem hilft uns der technische Fortschritt. Seit Jahrtausenden erlaubt uns das geschriebene Wort, Informationen zu speichern, die unser Gedächtnis überfordern würden. Manche betrachten heute das Internet als vorerst letzten Schritt zur Erweiterung der Intelligenz außerhalb des menschlichen Körpers. Allerdings könnte das World Wide Web uns auch dümmer machen: Möglicherweise verringert kollektive menschliche Intelligenz – sei es als Kultur oder als Computernetzwerk – den Evolutionsdruck, größere individuelle Intelligenz zu entwickeln. Die Zukunft wird es zeigen. ~

DER AUTOR

Douglas Fox arbeitet als freier Journalist in San Francisco. Er schreibt regelmäßig für »New Scientist«, »Discover« und »The Christian Science Monitor«. Fox wurde bereits mit mehreren Preisen ausgezeichnet, zuletzt mit dem Award for Reporting on a Significant Topic der American Society of Journalism and Authors.

QUELLEN

Herculano-Houzel, S. et al.: Cellular Scaling Rules for Primate Brains. In: Proceedings of the National Academy of Sciences USA 104, S. 3562–3567, 2007

van den Heuvel, M. P. et al.: Efficiency of Functional Brain Networks and Intellectual Performance. In: Journal of Neuroscience 29, S. 7619–7624, 2009

Roth, G., Dicke, U.: Evolution of the Brain and Intelligence. In: Trends in Cognitive Sciences 9, S. 250–257, 2005

LITERATURTIPPS

Güntürkün, O.: Wann ist ein Gehirn intelligent? In: Spektrum der Wissenschaft 11/2008, S. 124–132
Überblick über die neuroanatomischen Grundlagen der Intelligenz

Wolf, C.: Intelligenz 2.0. In: Gehirn&Geist 4/2010, S. 42–48
Darstellung, wie die modernen elektronischen Medien auf die menschliche Intelligenz einwirken

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1146807**

MOLEKULARMEDIZIN

Zutritt verboten für HIV

Forscher manipulieren Immunzellen von HIV-Infizierten außerhalb des Körpers. So wollen sie diese genetisch dauerhaft gegen das Virus resistent machen. Im Visier haben die Wissenschaftler ein zentrales Einlassprotein für den Erreger.

Von Carl H. June und Bruce L. Levine

Vor gut drei Jahren erschien eine medizinische Veröffentlichung über eine spektakuläre HIV-Behandlung, deren Erfolg noch heute fast unglaublich klingt. Mitarbeiter der Berliner Charité und des Robert Koch-Instituts hatten einem langjährigen HIV-Patienten fremdes Knochenmark, also neue Blutstammzellen, übertragen, als er eine Leukämie bekam. Das Material stammte aber von einem Spender, der auf Grund einer genetischen Besonderheit resistent gegen das HI-Virus ist, denn seine Immunzellen lassen den Erreger einfach nicht hinein. Die Ärzte hofften, mit dieser Transplantation gleichzeitig mit dem Blutkrebs auch die HIV-Infektion einzudämmen. Ihre Erwartung wurde sogar noch übertroffen: Nach einiger Zeit ließen sich bei dem Patienten mit verschiedenen Tests keinerlei Virusspuren mehr nachweisen – nicht einmal in jenen Geweben, in denen sich der Erreger oft lange zu verbergen pflegt.

Auch fünf Jahre nach dem Eingriff zeigt Timothy Ray Brown keinerlei Anzeichen, dass er das Virus noch in sich trägt. Seine Identität gab er inzwischen preis: Er ist Kalifornier und lebte damals in Berlin. Medikamente gegen HIV nimmt er schon seit der Transplantation nicht mehr. Über 60 Millionen Menschen haben sich bislang mit dem Aidsvirus infiziert, aber einzig dieser Amerikaner scheint es allen medizinischen Tests zufolge wieder vollständig losgeworden zu sein.

Das in seinem Fall angewandte Verfahren einer Blutstammzelltransplantation lässt sich allerdings kaum bei weiteren HIV-Infizierten einsetzen. Allzu vieles spricht dagegen – nicht zuletzt, dass man zuvor das Immunsystem des Patienten zerstören müsste, immer ein lebensgefährliches Unterfangen. Außerdem muss der Spender gleichzeitig mit dem Patienten möglichst weit gehend immunkompatibel sein und resistent gegen den Aidserreger – was beides schon für sich allein selten genug auftritt. Aber der Erfolg der Berliner Ärzte spornt nun weltweit Wissenschaftler an, nach weniger riskanten und kostspieligen Wegen zu suchen, um HIV-Infizierten quasi ein neues, gegen das Virus resistentes Immunsystem zu geben. Dessen genetisch veränderte Zellen würden dem Erreger gewissermaßen die Tür vor der Nase zuschlagen. Das Virus könnte sie nicht befallen, sich nicht weiter vermehren und darum auch nicht länger im Körper ausbreiten. Statt wie mit bisherigen Therapien das HI-Virus nur zu unterdrücken, könnte ein solcher genetischer Ansatz möglicherweise Infizierte wirklich heilen.

OWEN GILDERSLEEVE

Aidsviren (rote Körper in dieser schematischen Darstellung) befallen Immunzellen (weiß), die passende Erkennungsmoleküle (weiße Ausstülpungen) tragen. Mediziner möchten Zellen ohne diese Moleküle konstruieren (weißes Rad in der Mitte) und sie damit vor der Infektion schützen.

Eine solche neue Behandlungsmethode entwickeln und testen wir und unsere Mitarbeiter derzeit. Laborversuche damit waren viel versprechend, und nun führen wir an einer kleinen Zahl von HIV-Patienten erste klinische Studien durch. Uns erwartet zwar noch viel Forschungsarbeit, und wir haben auch keine Gewähr, dass unser Ansatz Erfolg haben wird. Aber es spricht doch einiges dafür, dass sich diese Methode eignen könnte, um das Leben von Millionen HIV-Infizierten grundlegend zu verbessern.

Unsere Vorgehensweise kombiniert zwei medizinische Ziele im Kampf gegen das Aidsvirus, die Wissenschaftler schon länger verfolgen. Zum einen geht es darum, wie man das Immunsystem auf HIV ansetzen kann. Zum anderen würden Mediziner die Viren gern von vornherein daran hindern, in ihre Lieblingszellen einzudringen: bestimmte so genannte T-Zellen des Immunsystems, nämlich die T-Helferzellen oder CD4+-Zellen.

Diese T-Helferzellen fungieren gewissermaßen im Mittelfeld des Immunsystems. Sie koordinieren das Zusammenspiel aller möglichen Sorten von Immunzellen. Infizieren HI-Viren T-Helferzellen, richten sie nicht gleich sonderlich großen Schaden an. Später aber, wenn diese Immunzellen zwecks Abwehr einer anderen Infektion aktiviert werden, spucken sie stattdessen neue Viren aus. Schlimmer noch: Der Erreger tötet schließlich diese vermittelnden T-Zellen und somit entscheidende Mitspieler des Immunsystems. Damit schwächt er allmählich die Abwehrkräfte so massiv, dass der Organismus Infektionen immer schlechter zu bekämpfen vermag – bis hin zum Endstadium Aids.

Forscher suchen schon lange nach Möglichkeiten, das Immunsystem gegen Krebserkrankungen oder Virusinfektionen anzustacheln. Beispielsweise werden dem Patienten T-Zellen entnommen, die man dann im Labor vermehrt und gleichzeitig so manipuliert, dass sie sich stärker gegen den Krebs beziehungsweise gegen die Infektion richten. Die solchermaßen getrimmten Immunzellen erhält der Patient dann wieder zurück.

Wir beide schlossen uns diesem Forschungsgebiet vor 20 Jahren an. Damals kam Levine nach Bethesda (Maryland) an das heutige Walter Reed National Military Medical Center, wo einer von uns (June) arbeitete. Wir konnten bereits auf Untersuchungen anderer Wissenschaftler aufbauen, etwa von Philip Greenberg und Stanley Riddell vom Fred Hutchinson Cancer Research Center in Seattle (Bundesstaat Washington) sowie Malcolm Brenner und Cliona Rooney, die heute am Baylor College of Medicine in Houston (Texas) tätig sind.

Wir wollten bessere Methoden zur Zucht von T-Zellen außerhalb des Organismus entwickeln. Denn sie ließen sich damals im Labor nur mit viel Aufwand vermehren, indem man verschiedenste Botenstoffe dazugab. Oder man mischte sie mit einer weiteren Immunzellsorte, die ebenfalls vom Patienten stammen musste: so genannten dendritischen Zellen. Sie veranlassen normalerweise T-Zellen, heranzureifen und sich stark zu vermehren.

Wir wollten bessere Methoden zur **Zucht von T-Zellen außerhalb des Organismus** entwickeln

Unsere Idee war nun, quasi künstliche dendritische Zellen zu benutzen. Das waren winzige Magnetperlen, etwas kleiner als T-Zellen, mit zwei verschiedenen Proteinen auf ihrer Oberfläche, die Moleküle auf dendritischen Zellen nachahmten. Als wir diese Perlen mit T-Zellen zusammengaben, erfüllten sie ihre Aufgabe sehr gut. Während wir ungefähr alle zwei Wochen neue Kügelchen nachgaben, wuchs die T-Zellkolonie mehr als zwei Monate lang auf ein Billionenfaches an.

Danach verwendeten wir die Methode für Blutproben von HIV-infizierten Versuchspersonen. Erstaunlicherweise waren die neu gewonnenen T-Zellen eine Zeit lang fähig, sich gegen ein Vordringen von HIV zu schützen. Der Effekt war signifikant, hielt aber nicht an. Als wir das Resultat 1996 veröffentlichten, konnten wir diese verblüffende Resistenz gegen das Virus noch nicht deuten.

Doch bereits im selben Jahr sollte sich von anderer Seite eine Erklärung anbahnen. Denn Virusforscher entdeckten zur gleichen Zeit einen molekularen Aspekt beim Angriff des Aidserregers auf T-Zellen, was ihm mitunter zum Verhängnis wird. Zu Beginn der Aidsepidemie hatte sich bald herausgestellt, dass einige Menschen offensichtlich gegen eine HIV-Infektion resistent sind. Auch wenn sie dem Virus mehrfach ausgesetzt werden, scheinen sie dagegen gefeit. Den Grund dafür konnten gleich mehrere Forscherteams Ende 1996 vermelden: T-Helferzellen sowie bestimmte andere Zellen tragen auf ihrer Oberfläche ein Protein, CCR5-Rezeptor genannt, das sozusagen als Türöffner agiert. Ohne dieses Protein bekommt das HI-Virus, zumindest in der Regel, keinen Zugang in die Zelle (siehe Kasten rechts). Und wer solche Eiweißmoleküle von Natur aus nicht besitzt, steckt sich offenbar nicht an (siehe Spektrum der Wissenschaft 2/1998, S. 38).

AUF EINEN BLICK

NEUE GENTHERAPIE FÜR HIV-PATIENTEN?

1 Der Aidserreger dringt in Immunzellen gewöhnlich mit Hilfe eines Oberflächenproteins ein. Menschen, die diesen Rezeptor – **CCR5** – wegen eines defekten Gens nicht haben, sind weit gehend gegen das Virus immun.

2 Mit einem neuen, sehr präzisen gentechnischen Verfahren wollen Mediziner diesen **Gendefekt an Immunzellen** nachahmen. Sie hoffen, dadurch das Immunsystem von HIV-Infizierten auf Dauer stabil gegen das Virus machen zu können.

3 Die ersten Tests hiermit scheinen bisher Erfolg versprechend. Trotzdem wartet auf die Forscher noch viel Entwicklungsarbeit, bis ein solches Verfahren möglicherweise in die **klinische Praxis** eingeführt werden könnte.

Bei diesen Menschen fehlen dem Gen für CCR5 einige Bausteine, genauer gesagt ein Abschnitt von 32 Nukleotiden. Dadurch ist der Proteinfaden zu kurz, und das verstümmelte Molekül findet den Weg zur Zelloberfläche nicht. Das defekte Gen namens *CCR5-Delta32* besitzen etwa ein Prozent der Kaukasier (Menschen europäischer Herkunft) zweifach, tragen es also auf beiden zusammengehörigen Chromosomen. Die Betreffenden sind gegen die Infektion in hohem Grad resistent. Bei Afrikanern, Asiaten und Indianern kommt die Mutation viel seltener vor. Wer sie aufweist, ist dadurch offenbar gesundheitlich nicht beeinträchtigt, vielleicht allerdings mehr als andere anfällig für eine Infektion mit dem Westnilvirus, das von Mücken übertragen wird und Fieber erzeugt.

Menschen, die das veränderte Gen nur einmal geerbt haben und auf dem zweiten Gen die nicht mutierte Erbsequenz tragen, können sich mit HIV infizieren. Es dauert aber meist länger, bis sie schwer an Aids erkranken. Wie sich herausstellte, sind bestimmte natürliche Botenstoffe – Beta-Chemokine – dazu fähig, die normalen CCR5-Rezeptoren zu blockieren und so den HI-Virusbefall von Zellen zu verhindern. Auf eine Rezeptorblockade zielt denn auch eine Klasse von Anti-HIV-Medikamenten. Es ist jedoch schwer, durch Zufuhr solcher Wirkstoffe ständig sämtliche dieser Rezeptoren auf allen damit ausgestatteten Zellen zu überfluten. Außerdem vermag das Virus so zu mutieren, dass es die künstliche Blockade austrickst.

Veränderte Immunzellen aus dem Labor mit jahrelanger Lebensdauer

Die Funktion des CCR5-Rezeptors bei einer HIV-Infektion brachte uns darauf, warum unsere gezüchteten T-Zellen eine Zeit lang resistent gegen das Virus waren: Durch die Aktivierung mit den Magnetperlen stellten sie aus irgendwelchen Gründen ihre Produktion dieser Pförtner ein.

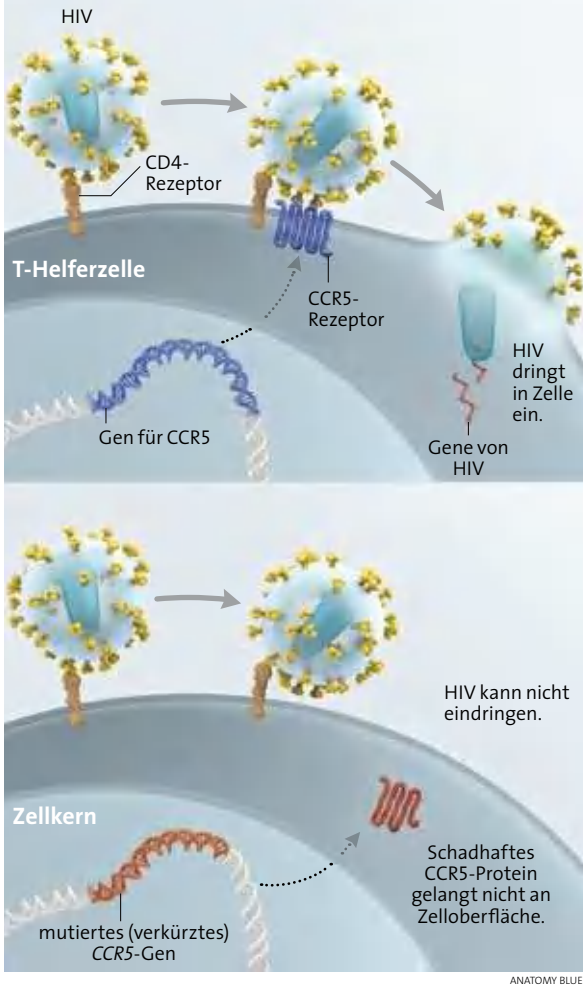
Als wir das erkannten, überlegten wir, ob sich daraus eine neue Behandlung gegen HIV entwickeln ließe. Beim ersten Schritt arbeiteten wir mit Kristen Hege und Dale Ando zusammen, die damals bei der in San Francisco ansässigen Biotechnologiefirma Cell Genesys beschäftigt waren. Klinische Sicherheitstests sollten zunächst klären, ob man Menschen gefahrlos mit genetisch veränderten T-Zellen behandeln kann, die mit unserer Magnetperlenmethode vermehrt wurden und nun HIV-infizierte Zellen finden und angreifen sollten. Tatsächlich erwiesen sich diese T-Zellen aus Laborzucht als ungefährlich, und sie blieben im Körper von Patienten noch Jahre nach der Infusion am Leben. Leider aber nutzten sie den Behandelten nicht viel, denn die von uns damals verwendete genetische Abwandlung trug nur wenig dazu bei, die Vermehrung des Virus einzudämmen. Deswegen stellte Cell Genesys das Projekt schließlich ein.

Wir beide waren schon einige Jahre an der University of Pennsylvania in Philadelphia, als uns Ando dort 2004 besuchte und ein zweites Experiment vorschlug. Sein neuer Arbeitgeber, das Unternehmen Sangamo BioSciences in Richmond (Kalifornien), hatte damals gerade ein Verfahren entwickelt, mit dem man den DNA-Strang eines gewünschten Gens an genau ausgewählter Stelle zerschneiden konnte, um es dann gezielt zu verändern. Die neue Methode funktionierte grundlegend anders und war zudem viel effektiver als bisherige Vorgehensweisen. Bis dahin konnte man nicht präzise steuern, welche Gene oder welche ihrer Abschnitte modifiziert werden.

Bei diesem mittlerweile oft eingesetzten Verfahren benutzt man eine Kombination aus zwei Proteintypen, die natürlicherweise nicht aneinandergekoppelt vorkommen. Zum

Wie HIV Immunzellen entert

HIV zerstört das Immunsystem, weil es die wichtigen T-Helferzellen befällt und mit der Zeit zu Grunde richtet. Zutritt verschafft es sich über ein Protein auf diesen Zellen, den Rezeptor CCR5, an den es sich anlagert (oberes Bild). Manche Menschen sind gegen die Infektion resistent, da ihr Gen für den Rezeptor mutiert ist und dieser ihnen deswegen fehlt (unten). Künstliche Mutationen könnten einen ähnlichen Vorteil bringen.



ANATOMY BLUE

Erkennen der gewünschten Schnittstelle dienen so genannte Zinkfingerproteine, zum Zerschneiden der DNA nimmt man Enzyme – bestimmte Nukleasen –, die beide Stränge einer DNA-Doppelhelix durchtrennen. Das Ganze heißt dann Zinkfingernuklease: ein künstliches molekulares Produkt, das Forscher gezielt zum Verändern spezifischer Gene von Pflanzen oder Tieren konstruieren.

Zinkfingerproteine bilden um zentrale Zinkatome herum kleine fingerartige Strukturen aus (siehe Spektrum der Wissenschaft 4/1993, S. 54). Viele von ihnen binden sich mit ihren Fingern an bestimmte Buchstabenfolgen – Nukleotidsequenzen – in der DNA und dienen dadurch als »Transkriptionsfaktoren« zum Ablesen von Genen. Der Mensch hat rund 2500 verschiedene Zinkfingerproteine, die jeweils eine spezifische Nukleotidsequenz erkennen.

Ando hatte nun die Idee, das *CCR5*-Gen von T-Zellen mit Hilfe von speziellen Zinkfingernukleasen so zu verändern, dass kein funktionsfähiges Protein für den CCR5-Rezeptor mehr entstehen könnte, so dass diese Zellen fortan gegen das HI-Virus resistent wären. Praktisch handelte es sich um eine künstlich erzeugte, gezielte Mutation. Seine Firma müsste zuerst passende Zinkfingerproteine entwickeln, die sich im Gen vor und hinter einer von uns auszuwählenden Passage anlagern würden, die aus der Erbsequenz verschwinden sollte. Anschließend käme es darauf an, jene Proteine jeweils mit den betreffenden Nukleasen zu verkoppeln. Diese Werkzeuge würden dann in die T-Zellen eingebracht und aus dem DNA-Doppelstrang das gewünschte Stück heraustrennen (siehe Kasten rechte Seite). Sie müssten dabei so hochpräzise funktionieren, dass nicht versehentlich andere Gene zu Schaden kämen. Den Rest, nämlich die zerschnittenen Stränge wieder zusammenzufügen, würde die Zelle selbst erledigen. Ihr DNA-Reparaturapparat würde den Doppelstrangbruch bemerken und in Aktion treten. Der Clou hierbei, der noch zum Gendefekt beitrüge: Bei der Reparatur unterlaufen oft Fehler, wodurch an der früheren Schnittstelle später ein paar Bausteine zu viel oder zu wenig vorhanden sind.

Einen Versuch war es uns wert. Denn reizvoll war das Zinkfingersystem auf jeden Fall – nicht nur weil man mit der Methode sehr spezifisch ein ganz bestimmtes Stück aus dem *CCR5*-Gen herausschneiden könnte, sondern auch weil die dazu verwendeten Hilfsproteine nur für eine kurze Zeit zu funktionieren hatten und in den Zellen keine potenziell gefährlichen Rückstände hinterlassen würden.

Als einige Jahre später die erfolgreiche Behandlung des Berliner Patienten bekannt wurde, hatten wir bereits von der US-Arzneimittelbehörde FDA und den National Institutes of Health in Bethesda (Maryland) die Genehmigung erhalten, mit unserem vorne beschriebenen Verfahren Sicherheitsstudien am Menschen durchzuführen. Die Nachrichten aus Deutschland bestätigten unsere Hoffnung, dem Aidsvirus zu Leibe rücken zu können, indem wir HIV-Patienten Immunzellen entnahmen, deren *CCR5*-Gene beschädigten, die mutierten Zellen künstlich vermehrten und den Betreffenden wieder zurückgaben.

Eine kaum wiederholbarer therapeutischer Ansatz

Eine HIV-Therapie, wie sie dem Ärzte- und Wissenschaftlerteam um den Hämatologen Gero Hütter von der Charité gelang, dürfte nicht leicht ein zweites Mal möglich sein. Der Patient war vorher über zehn Jahre lang HIV-infiziert gewesen und erfolgreich mit den üblichen antiviralen Medikamenten behandelt worden. Es ging ihm einigermaßen gut – doch dann bekam er eine akute myeloische Leukämie, die mit der HIV-Infektion nicht zusammenhing.

Gegen die Leukämie erhielt er zuerst eine Chemotherapie, doch nach einiger Zeit meldete sich der Blutkrebs zurück. Als einzig mögliche Rettung blieb schließlich eine Knochenmarktransplantation, somit die Zerstörung des alten Immunsystems und dann der Aufbau eines praktisch neuen – einschließlich neuer T-Zellen – aus Blutstammzellen eines Spenders. Es galt also, in den Datenbanken einen Knochenmarkspender zu finden, dessen immunologische Gewebemerkmale, die so genannten HLA-Antigene, mit denen des Patienten möglichst gut übereinstimmten. Eine hohe Gewebeverträglichkeit oder Histokompatibilität ist für eine erfolgreiche Transplantation Voraussetzung. Andernfalls würden die fremden Immunzellen Gewebe des Empfängers angreifen, und umgekehrt könnten sich unter Umständen Reste des alten Immunsystems gegen das neue wehren.

Aber hierbei ließ Hütter es nicht bewenden. Er hätte gern einen Spender gehabt, der außerdem zwei mutierte *CCR5*-

MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de

»Nature«-Video über Gentechnik mit Hilfe von Zinkfingernukleasen:

www.spektrum.de/methodedesjahres2011

Gene besaß. Dann könnte, so hoffte er, das im Körper ja weiterhin vorhandene Virus dem neuen Immunsystem nichts anhaben. Und das gelang! Unter mehr als 60 untersuchten Kandidaten fand sich tatsächlich jemand mit zwei defekten *CCR5*-Genen. Auch ein bisschen Glück half mit, denn der Patient besitzt ein sehr häufiges HLA-Muster. Trotzdem war der Fund unerwartet. Schließlich hat jeder Mensch andere HLA-Antigene, und überdies liegen deren Erbsequenzen nicht auf demselben Chromosom wie das *CCR5*-Gen. Wie selten solch ein Zusammentreffen ist, lässt sich daran ermessen, dass Ähnliches Medizinern auf der ganzen Welt trotz vielen Bemühens bisher nicht wieder gelang.

Gleich zwei Knochenmarkübertragungen waren am Ende notwendig, um den Berliner Patienten von seiner Leukämie zu heilen. So sehr ihm die harten Behandlungen zugesetzt haben – über fünf Jahre nach der Transplantation lassen sich im Körper des Mannes selbst mit hochempfindlichen molekularen Tests keine HI-Viren mehr nachweisen: weder im Blut noch in der Leber, nicht im Darm oder Gehirn, im Lymphgewebe oder Blutplasma. Und dabei nimmt er seit dem Eingriff keine antiviralen Medikamente mehr. Allerdings benötigt er wegen der Knochenmarktransplantation weiterhin medikamentöse Behandlung.

Niemand weiß, ob der Erreger bei diesem Mann wirklich ausgerottet ist, ob also die Virusinfektion völlig kuriert ist. Denn das HI-Virus kann seine Gene in verschiedenste Zellen des Körpers einbauen und dort jahrelang schlummern (siehe Spektrum der Wissenschaft 11/2009, S. 63). Doch vielleicht kommt es darauf jetzt gar nicht mehr an, wenn nämlich das neue Immunsystem jegliche frischen Infektionsschübe schon in ihren Anfängen lahmlegt. Das wäre dann zumindest eine funktionelle Heilung.

Gleiches Resultat auf anderem Weg suchen

So bald dürfte es nicht wieder geschehen, dass eine HIV-Infektion mit einer Knochenmarktransplantation behandelt wird. Dem steht nicht nur im Weg, dass ein Zusammentreffen aller dazu erforderlichen biologischen Merkmale extrem unwahrscheinlich ist. Am meisten sprechen dagegen die damit verbundenen Gefahren und Belastungen für den Patienten. Solch eine Transplantation ist für die Betroffenen hochriskant, und auch später brauchen sie fortlaufend Immunsuppressiva und müssen ihre Lebensführung in vielem an ihre besondere Situation anpassen. Zahlreiche HIV-Infizierte fühlen sich mit antiviralen Medikamenten einigermaßen gesund und leistungsfähig. Sie würden sich wohl nicht einer Knochenmarkübertragung mit all ihren Konsequenzen unterziehen.

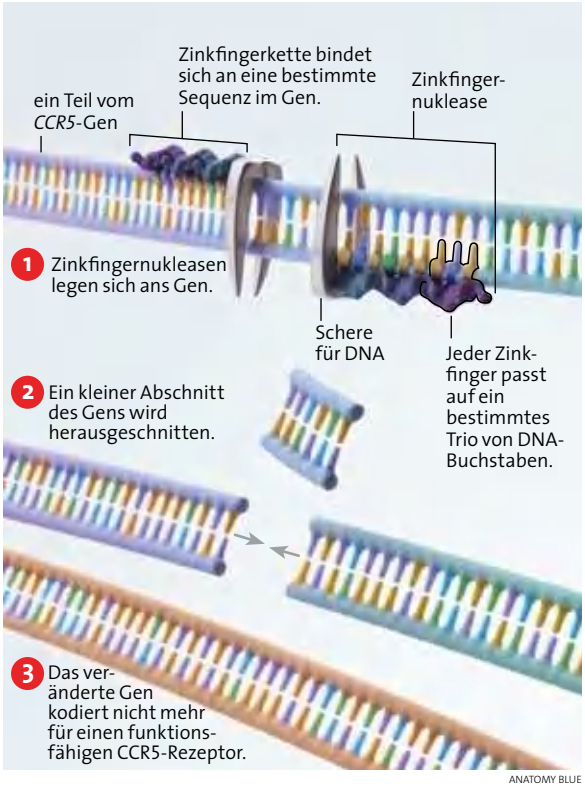
Zurück zu unserer eigenen Forschung. Zwar war anzunehmen, dass der mutmaßliche HIV-freie Zustand des Berliner Patienten mit dem defekten *CCR5*-Gen der Knochenmarkspende zusammenhing. Aber dies musste nicht der einzige Grund sein. Möglicherweise hatte die jahrelange antivirale Behandlung das Reservoir schlummernder Viren schließlich erschöpft. Vielleicht waren letzte Reste aber auch mit der gewollten Zerstörung des alten Immunsystems zu Grunde gegangen; oder es geschah, als der Mann einmal eine lebensbedrohliche Attacke der neuen Immunzellen erlitt: Die könnten dabei noch übrige infizierte Zellen vernichtet haben. Trotzdem schien der Gendefekt bei der vermeintlichen Heilung im Vordergrund zu stehen, und wir setzten unsere Forschung hierzu mit neuem Elan fort.

Zu der Zeit hatte Sangamo BioSciences bereits den versprochenen Satz Zinkfingernukleasen entwickelt, die aus dem *CCR5*-Gen eine Passage in dem kritischen Abschnitt ausschneiden, der im defekten Gen fehlt. Ganz genau musste die

HIV-Therapie mit zielgenauen Genscheren?

Bei einem neuen gentechnischen Verfahren konstruieren Forscher aus zwei gekoppelten Proteinsorten molekulare Scheren, die den DNA-Doppelstrang an genau vorgesehener Stelle schneiden. Sie bestehen einerseits aus Nukleasen, die den Strang durchtrennen, und andererseits aus speziell für den Zweck maßgeschneiderten Zinkfingerproteinen zum Erkennen der richtigen Stelle.

Mit dieser Methode, hier schematisch grob skizziert, lässt sich in Immunzellen auch das Gen für den Rezeptor CCR5 so verändern, dass sie HIV keinen Einlass mehr gewähren. Die Zinkfingernukleasen trennen einen Teil aus dem Gen heraus (oben), und anschließend setzt die Zellmaschinerie das Gen verkürzt wieder zusammen (unten).



MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de

Unsere Themenseite »HIV«
finden Sie unter

www.spektrum.de/hiv

damit erzeugte Mutation mit der natürlich vorkommenden nicht übereinstimmen, denn es kam ja nur auf die Untauglichkeit des Proteins an.

Zusammen mit Elena Perez, die nach ihrer Promotion bei uns arbeitete, hatten wir zuvor nachgewiesen, dass die HIV-Infektion wohl auch selbst dazu beitragen könnte, das Immunsystem in Richtung stärkerer Virusresistenz umzugestalten, nachdem die Patienten einige der genetisch modifizierten T-Zellen erhalten hätten. In Laborstudien zumindest vermochten solche Zellen eine geschwächte T-Zellpopulation, die durch zugegebene HI-Viren Schaden erlitten hatte, wieder aufzufüllen und zu stabilisieren. Das leisteten sie sogar dann, wenn der Anteil an T-Zellen mit defektem *CCR5*-Gen zunächst gering war. Das heißt: T-Zellen mit funktionalem CCR5-Rezeptor gingen durch den Erreger zu Grunde, und die anderen, HIV-resistenten vermehrten sich und gewannen langsam die Oberhand.

Schutz ohne Virusmedikamente

Auch die vorläufigen Ergebnisse einer Sicherheitsprüfung des Verfahrens an HIV-Patienten stimmen recht zuversichtlich. Bei einer Studie in Philadelphia, die der Arzt Pablo Tebas leitet, erhielt der erste Teilnehmer im Sommer 2009 eine Rückinfusion von eigenen, aber am *CCR5*-Gen veränderten T-Zellen. Seitdem haben wir in den von den National Institutes of Health finanzierten Tests weitere elf Freiwillige behandelt. Eine ähnliche Studie führt Sangamo an der amerikanischen Westküste durch.

Solche Sicherheitsprüfungen sind an sich noch nicht dafür ausgelegt, schon die Wirksamkeit einer Behandlung nachzuweisen. Dennoch beobachten wir anhand der laufenden Blutuntersuchungen bei allen Patienten einen Anstieg der T-Helferzellen gegenüber dem anfänglichen Wert. Demnach scheint unser Eingriff T-Zellen wie erhofft zu schützen. Außerdem lassen sich jetzt im Blut und im Lymphgewebe des Darms dieser Personen T-Zellen nachweisen, denen funktionale CCR5-Rezeptoren fehlen. Sie müssen folglich von den manipulierten Immunzellen abstammen.

Als Nächstes wäre nun zu untersuchen, ob oder inwieweit diese T-Zellen die im Körper vorhandenen HIV-Partikel in Schach halten können. Hierfür wollen wir uns eines anerkannten und üblichen, aber dennoch gewagten Vorgehens bedienen: Unter strenger ärztlicher Kontrolle soll die antivirale Behandlung von Teilnehmern eine Zeit lang ausgesetzt werden. Ein erster Versuch damit erfolgte während zwölf Wochen bei einem Freiwilligen, der schon erblich bedingt auf einem Chromosom ein defektes *CCR5*-Gen besitzt und dadurch von selbst ein wenig gegen HIV gewappnet ist. Am Ende der medikamentenlosen Phase fanden wir bei ihm weder im Blut noch im Lymphgewebe Virusspuren. Die anderen, später behandelten Teilnehmer befinden sich noch in verschiedenen Phasen der Anschlusstherapie und Verlaufskontrolle nach der Rückinfusion der T-Zellen, die während des nächsten Jahres abgeschlossen sein dürften.

Nun sind weitere klinische Studien vorgesehen, um diesmal die Wirksamkeit unseres Ansatzes eingehend zu prüfen. Sollten die verschiedenen Tests erfolgreich verlaufen, böte eine HIV-Behandlung unter Zuhilfenahme von Zinkfingernukleasen eine gute und deutlich preisgünstigere Alternative zu einer Knochenmarkübertragung – und auch zu einer lebenslangen antiviralen Medikation.

Noch vor wenigen Jahren wagten Mediziner kaum auf sichere, wirksame und nicht allzu teure Therapien zu hoffen, die Menschen mit HIV von der ständigen Medikamenteneinnahme mit all ihren Nebenwirkungen zu befreien, geschweige denn von der Infektion zu heilen vermögen. Auch wenn unsere neue Methode Letzteres nicht leisten sollte, so glauben wir doch, dass sie diesem Ziel so nahe kommt wie keine andere zuvor.

DIE AUTOREN

Carl H. June (links) ist Arzt und Wissenschaftler an der Perelman School of Medicine der University of Pennsylvania in Philadelphia. Er erforscht, wie sich das Immunsystem mit Hilfe genetischer Eingriffe besser gegen Krebs und HIV wappnen ließe. Dort arbeitet auch **Bruce L. Levine.** Der Immunologe leitet den Bereich Klinische Produktion von Zellen und Impfstoffen. Er befasst sich mit Zell- und Gentherapien.

QUELLEN

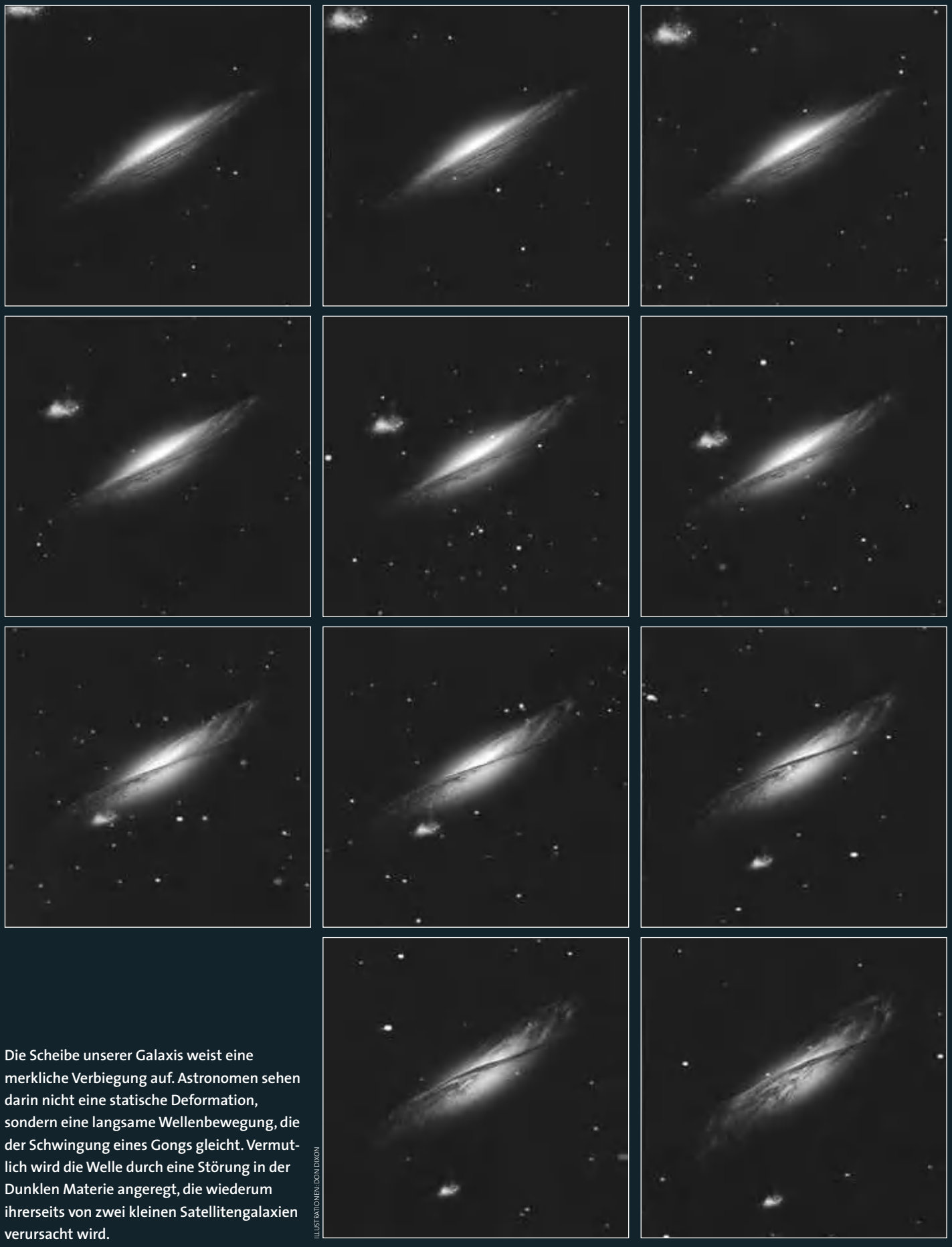
Cannon, P., June, C.: Chemokine Receptor 5 Knockout Strategies. In: Current Opinions in HIV and AIDS 6, S. 74–79, Januar 2011
Hütter, G. et al.: Long-Term Control of HIV by *CCR5 Delta32/Delta32* Stem-Cell Transplantation. In: The New England Journal of Medicine 360, S. 692–698, 12. Februar 2009
Perez, E. E. et al.: Establishment of HIV-1 Resistance in CD4+ T Cells by Genome Editing Using Zinc-Finger Nucleases. In: Nature Biotechnology 26, S. 808–816, 2008
Urnov, F. D. et al.: Genome Editing with Engineered Zinc Finger Nucleases. In: Nature Reviews Genetics 11, S. 636–646, September 2010

LITERATURTIPP

25 Jahre HIV-Forschung – Schwerpunkt Aids: In: Spektrum der Wissenschaft 11/2009, S. 54–67
Forscher berichten, warum das Virus so schwer zu besiegen ist und wie sie es dennoch austricksen möchten.

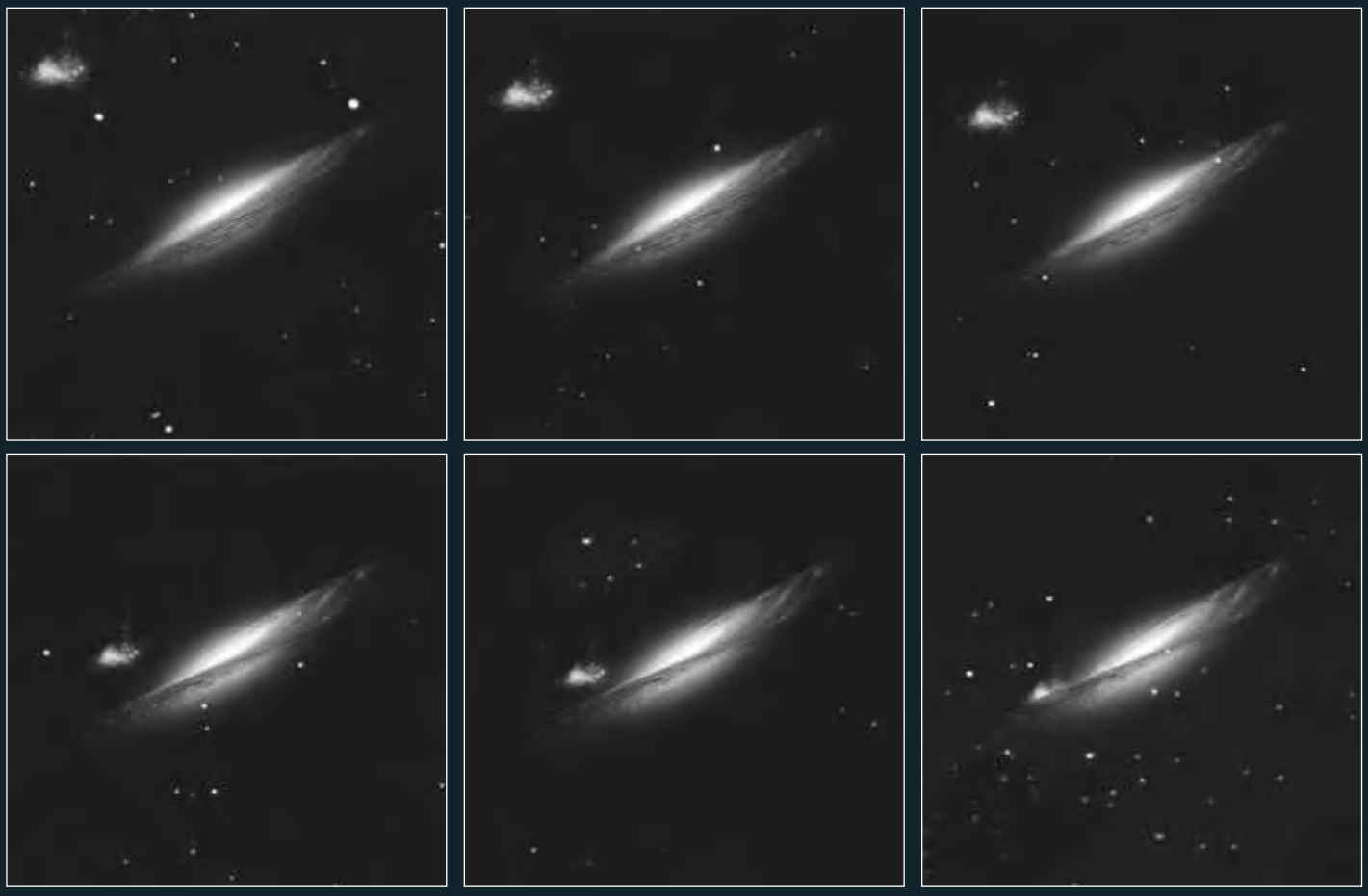
WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1146805**



Die Scheibe unserer Galaxis weist eine merkliche Verbiegung auf. Astronomen sehen darin nicht eine statische Deformation, sondern eine langsame Wellenbewegung, die der Schwingung eines Gongs gleicht. Vermutlich wird die Welle durch eine Störung in der Dunklen Materie angeregt, die wiederum ihrerseits von zwei kleinen Satellitengalaxien verursacht wird.

ILLUSTRATIONEN: DON DIXON



ASTROPHYSIK

Die dunkle Seite der **Milchstraße**

Der Außenrand unserer Galaxis ist wellenförmig verbogen, ähnlich dem dezenten Schwung einer eleganten Hutkrempe. Als Erklärung bieten sich Schwerkrafteffekte der Dunklen Materie an.

Von Leo Blitz

Für mein erstes Forschungsprojekt an der University of California in Berkeley maß ich 1978 die Rotationsgeschwindigkeit von riesigen sternbildenden Gaswolken, die weit draußen um das Zentrum unserer Galaxienscheibe kreisen. Ich hatte die damals genaueste Methode zur Bestimmung dieser Geschwindigkeiten entwickelt und zeichnete gerade die Resultate per Hand auf Millimeterpapier, als zwei weitere Milchstraßenexperten vorbeikamen, Frank Shu und Ivan King. An dem entstehenden Diagramm erkannten wir sofort, dass die Galaxis vor allem an ihren Rändern riesige Mengen nicht sichtbarer Materie enthalten muss. Wir überlegten hin und her, woraus diese »Dunkle Materie« wohl bestehen mochte, aber all unsere Spekulationen erwiesen sich rasch als falsch.

In den 1970er und 1980er Jahren kamen viele Astronomen zu dem Schluss, dass der größte Teil der Materie im Universum aus einer mysteriösen Substanz bestehen muss, die Strahlung weder aussendet noch absorbiert und sich nur durch ihre Schwerkraft bemerkbar macht. Wie die Messungen der WMAP-Raumsonde unterdessen bestätigt haben, trägt die Dunkle Materie fünfmal so viel zur Masse im Universum bei wie die gewöhnliche Materie aus Protonen, Neutronen, Elektronen und so fort. Mangels besseren Wissens wird derzeit meist angenommen, die Dunkle Materie bestehe aus exotischen Teilchen, die von bislang unbewiesenen Theorien vorhergesagt werden und noch nie in Teilchenbeschleunigern aufgetaucht sind (siehe »Der verborgene Bauplan des Universums« von Jonathan Feng und Mark Trodden, Spektrum der Wissenschaft 1/2011, S. 38). Eine besonders radikale Hypothese behauptet gar, das newtonsche Gravitationsgesetz und Einsteins allgemeine Relativitätstheorie seien falsch oder müssten zumindest modifiziert werden.

Trotz dieser Ungewissheit erklärt die Dunkle Materie einige rätselhafte Eigenschaften der Milchstraße. Zum Beispiel wissen die Astronomen seit mehr als 50 Jahren, dass die Ränder der Galaxis verbogen sind wie eine auf der Heizung vergessene Schallplatte. Erst die Wirkung der Dunklen Materie liefert dafür eine plausible Erklärung. Außerdem sagen Computermodelle der Galaxienbildung mit Dunkler Materie voraus, unsere Galaxis sei von Hunderten oder gar Tausenden kleiner Satellitengalaxien umgeben. Zunächst

AUF EINEN BLICK

EINE GEHEIMNISVOLLE MACHT

1 Obwohl das Wesen der **Dunklen Materie** noch unbekannt ist, vermag sie zu erklären, warum die äußere Scheibe der Milchstraße eine deutliche Verbiegung aufweist.

2 Ohne Mitwirkung der Dunklen Materie reicht die **Schwerkraft** der um die Milchstraße laufenden **Satellitengalaxien** bei Weitem nicht aus, um die Scheibe so stark zu deformieren.

3 **Modelle** sagen weitaus mehr Satellitengalaxien voraus, als tatsächlich beobachtet werden. Offenbar bestehen diese Objekte vorwiegend aus Dunkler Materie und lassen sich deshalb nur sehr schwer entdecken.

wurden zwar nur zwei Dutzend solcher Zwerggalaxien beobachtet, doch in den letzten Jahren entdeckten Astronomen immer mehr davon.

Um die Rolle der Dunklen Materie zu verstehen, brauchen wir zunächst ein grobes Bild vom Aufbau der Galaxis. Die gewöhnliche Materie – Sterne und Gas – bildet vier Strukturen:

- eine dünne Scheibe, welche die Spiralarme und den Ort unserer Sonne enthält;
- einen dichten Kern, der ein supermassereiches Schwarzes Loch birgt;
- eine längliche Verdickung namens Balken sowie
- einen kugelförmigen Hof oder »Halo« aus alten Sternen und Sternhaufen, der die übrige Galaxis umhüllt.

Unsichtbarer Einfluss

Die Dunkle Materie ist ganz anders angeordnet. Obwohl wir sie nicht sehen können, lässt sich ihre Lage aus den Rotationsgeschwindigkeiten der Sterne und Gase erschließen. Auf Grund ihrer Gravitationswirkung auf das sichtbare Material muss die Dunkle Materie annähernd kugelförmig verteilt sein und sich weit über den stellaren Halo hinaus erstrecken, wobei ihre Dichte im Zentrum am größten ist und mit dem Quadrat des Abstands vom Zentrum abfällt. Eine solche Verteilung wäre das natürliche Ergebnis einer so genannten hierarchischen Vereinigung: Nach einer gängigen Annahme verschmolzen im frühen Universum kleinere Galaxien sukzessive zu größeren wie der Milchstraße.

Jahrelang mussten sich die Astronomen mit dem simplen Bild der Dunklen Materie als einer riesigen Kugel aus unbekanntem Material begnügen. Doch in letzter Zeit konnten wir einige interessante Details herausarbeiten; demnach ist das Material nicht gleichmäßig verteilt, sondern bildet großräumige Klumpen.

Dieser Umstand vermag ein seltsames Phänomen zu erklären: warum die Galaxis verbogen ist. In den Außenbereichen der Scheibe, mehr als 50 000 Lichtjahre vom Zentrum entfernt, findet sich fast nur atomares Wasserstoffgas nebst wenigen Sternen. Und dieses Gas liegt, wie Vermessungen mittels Radioteleskopen zeigen, nicht in der Ebene der Milchstraße, wobei die Abweichung nach außen immer mehr zunimmt. Bei einem Radius von mehr als 75 000 Lichtjahren

weicht die Scheibe um gut 7500 Lichtjahre von der Ebene ab (siehe die Darstellung auf den folgenden Seiten).

Offenbar oszilliert das Gas auf und ab, durch die Ebene hindurch, während es mit der Scheibe um das galaktische Zentrum kreist. Diese Schwingungen dauern hunderte Millionen Jahre; wir beobachten nur einen winzigen Moment in diesem Zyklus. Im Grund verhält sich das Gas wie ein gewaltiger, in Zeitlupe vibrierender Gong – und wie ein solcher Klangkörper kann es mit mehreren Frequenzen schwingen, deren jede einer bestimmten Form des Körpers entspricht. Meine Kollegen und ich zeigten 2005, dass die beobachtete Verbiegung die Summe von drei Frequenzen darstellt, wobei der tiefste »Ton« 64 Oktaven unter dem eingestrichenen C liegt. Das Gesamtergebnis ist asymmetrisch: Auf der einen Seite der Galaxis liegt das Gas viel weiter außerhalb der Ebene als auf der anderen.

Als Radioastronomen in den 1950er Jahren die Verbiegung erstmals bemerkten, vermuteten sie als Ursache die Gravitationsanziehung der Magellanschen Wolken. Diese massereichsten Satellitengalaxien laufen schräg zur Milchstraßenebene und könnten mit ihrer Schwerkraft die Scheibe verzerren. Doch nach detaillierten Berechnungen erweisen sich diese Kräfte als viel zu schwach; im Vergleich zur Milchstraße sind die Magellanschen Wolken einfach winzig. Jahrzehntelang blieb der Grund für die ausgeprägte Verbiegung daher ein Rätsel.

Der galaktische Gong

Das änderte sich erst, als man erkannte, dass die Milchstraße Dunkle Materie enthält; überdies wurde die Masse der Magellanschen Wolken durch neue Schätzungen nach oben korrigiert. Da die Gasscheibe einem riesigen Gong gleicht, kann

Die Große Magellansche Wolke ist die massereichste Satellitengalaxie der Milchstraße. Anscheinend erzeugt sie in der Verteilung der Dunklen Materie Störungen, die ihrerseits die Form der Milchstraße beeinflussen.

MIT FRDL. GEN. VON ECKHARD SLAWIK

Die deformierte Galaxis

Die meisten Sterne und Gasmassen der Milchstraße bilden eine riesige Scheibe. Sie ist nicht völlig eben, sondern merklich gewellt – ähnlich einer schadhaften Schallplatte.

Renaissance einer alten Hypothese

In den 1950er Jahren vermuteten Physiker, die Schwerkraft zweier Satellitengalaxien, der Großen und der Kleinen Magellanschen Wolke, verursache die Verbiegung. Die Hypothese wurde verworfen, weil die Satelliten viel zu wenig Masse haben, um die Galaxis zu deformieren. Doch wie Astronomen heute wissen, ist der sichtbare Teil der Milchstraße von einer riesigen Kugel Dunkler Materie umgeben. Sie könnte die Gravitationswirkung der Wolken verstärken und so die Verbiegung erklären.

Sonne

klassische Ansicht der Milchstraße

Die Magellanschen Wolken erklären die Verbiegung nur zum Teil.

Magellansche Wolken

Halo aus Dunkler Materie (violett)

Wie ein Schiff auf hoher See hinterlassen die Magellanschen Wolken beim Durchqueren der Dunklen Materie eine Kielwelle. Die dadurch veränderten Gravitationskräfte erzeugen die beobachtete Verbiegung der Milchstraßenscheibe.

Darstellung vertikal stark gedehnt

DON DIXON; WARP SHAPE INSETS NACH: GYULA JÓZSA

Ein gewaltiger Gong

Die Verbiegung entspricht der Momentaufnahme einer Wellenbewegung, als wäre die Galaxis ein riesiger Gong. Die Welle setzt sich aus drei Resonanzschwingungen der Scheibe zusammen. Die durch Dunkle Materie verstärkte Schwerkraft der Magellanschen Wolken bildet den Schlegel, der den Gong in Schwingung versetzt.

der Umlauf der Magellanschen Wolken durch den Halo aus Dunkler Materie wie ein Schlegel wirken, der den Gong in Resonanzschwingungen versetzt – allerdings indirekt. Die Wolken erzeugen in der Dunklen Materie eine Nachströmung, ähnlich der Kielwelle hinter einem Ozeandampfer. Dadurch wird die sonst gleichmäßige Verteilung der Dunklen Materie lokal gestört, und erst das wirkt als der Gongschlegel, der die massearmen Außenbezirke der Scheibe in Schwingung versetzt. Allein wären die Magellanschen Wolken dafür zu schwach, aber die Dunkle Materie verstärkt ihre Wirkung gehörig.

Auf diese Idee kam Martin D. Weinberg von der University of Massachusetts Amherst 1998; später wandte er sie zusammen mit mir auf Beobachtungen der Milchstraße an, und damit konnten wir rechnerisch die drei Vibrationsmuster der Gasscheibe wiedergeben. Demnach wandelt sich die Form der Milchstraße kontinuierlich, während die Magellanschen Wolken ihre Kreise ziehen.

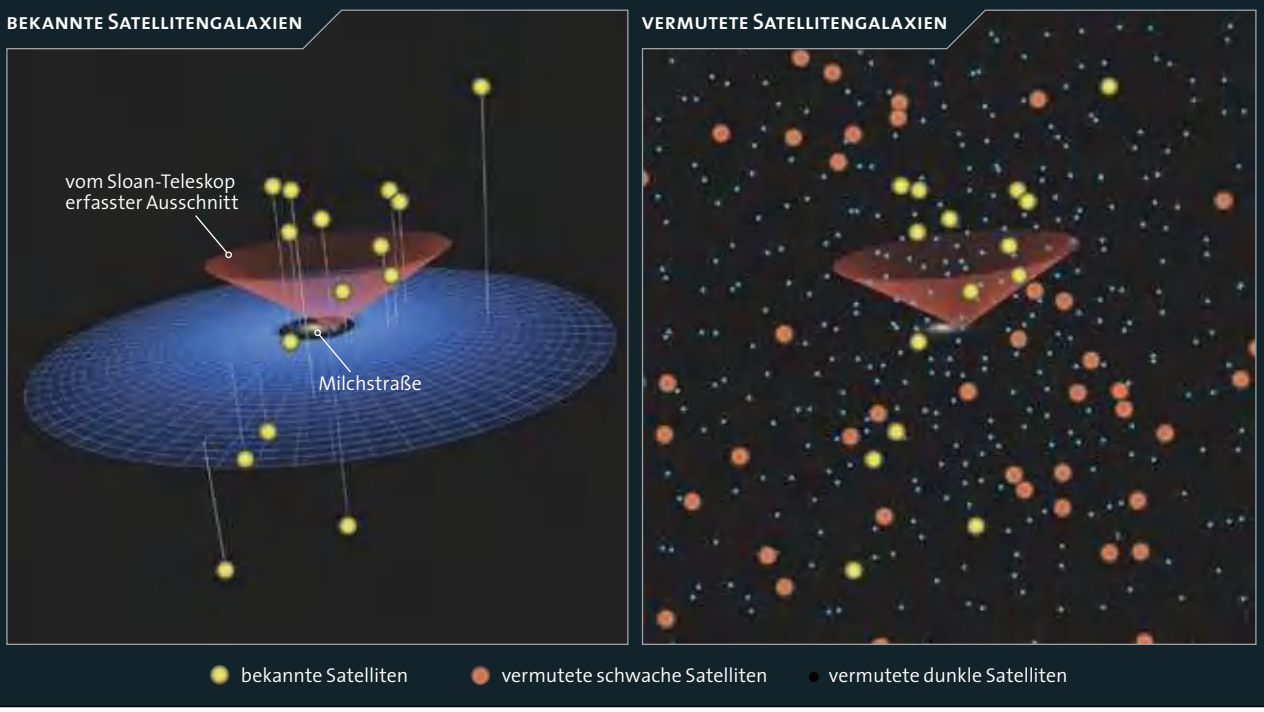
Die Verbiegung stellt nicht die einzige Asymmetrie in der Form der Milchstraße dar. Besonders ausgeprägt ist die einseitige Verdickung der äußeren Gasscheibe, die ebenfalls mit Radioteleskopen entdeckt wurde. Wenn man sich quer durch die Milchstraße eine Gerade vorstellt, auf der die Sonne und das galaktische Zentrum liegen, dann ist die Gasschicht auf der einen Seite der Galaxis rund doppelt so dick wie auf der anderen. Diese starke Asymmetrie ist instabil und sollte sich eigentlich mit der Zeit ausgleichen; es muss also einen Mechanismus geben, der sie aufrechterhält. 30 Jahre lang kannten die Astronomen das Problem, kehrten es aber unter den Teppich.

Zwei mögliche Erklärungen für das Phänomen berufen sich auf Dunkle Materie. Entweder ist die Milchstraße gegenüber dem kugelförmigen Halo der Dunklen Materie etwas verschoben, oder – wie Kanak Saha vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching meint – der Halo selbst ist nicht ganz symmetrisch. Beide Hypothesen stellen die alte Ansicht der Astronomen in Frage, Milchstraße und Halo wären gemeinsam aus der Verdichtung einer einzigen gigantischen Materiewolke hervorgegangen und hätten darum denselben Mittelpunkt. Insofern ist die Asymmetrie ein weiteres Indiz dafür, dass die Galaxis aus der Vereinigung kleinerer Einheiten hervorging und durch fortwährendes Einsammeln von intergalaktischem Gas weiterwuchs, denn beide Prozesse müssen nicht symmetrisch ablaufen. Da Gas, Sterne und Dunkle Materie sich unterschiedlich verhalten, muss das Zentrum der Galaxis nicht mit dem der Dunklen Materie übereinstimmen.

Um diese Idee zu prüfen, untersuchen Forscher die langen und dünnen Sternströme, die sich durch die Außenbereiche der Milchstraße ziehen. Diese Formationen sind die lang gezogenen Überbleibsel früherer Satellitengalaxien. Die meisten um die Milchstraße kreisenden Begleiter sind sphärische Zwerggalaxien: Sie sind rundlich, und ihre Masse beträgt meist nur ein Zehntausendstel von jener der Milchstraße. Mit der Zeit trudelt der Satellit aus seiner Bahn und gerät

Unauffällige Begleiter

Theoretisch sollten hunderte Satellitengalaxien um unsere Milchstraße kreisen, doch zunächst fanden die Astronomen nur rund zwei Dutzend davon. Eine neue Auswertung des Sloan Digital Sky Survey, einer Durchmusterung von einem Viertel des Sternenhimmels, hat kürzlich weitere Satelliten aufgespürt (links). Außerdem dürfte es noch viele lichtschwache und dunkle Begleitgalaxien geben, die sich der direkten Beobachtung entziehen (rechts).



DON DIXON, BEKANNTE SATELLITEN NACH: JAMES BULLOCK, UC IRVINE

unter den Einfluss der galaktischen Gezeitenkräfte; diese ziehen die Zwerggalaxie zu einem dünnen Faden auseinander (siehe »Die Schatten galaktischer Welten« von Rodrigo Ibata und Brad Gibson, Spektrum der Wissenschaft 9/2007, S. 52).

Da die Sterne in diesen Strömen die Galaxis in riesigen Entfernungen umkreisen, wo die Gravitationseffekte der Dunklen Materie groß sind, gibt der Verlauf der Ströme Auskunft über die Form des Halos. Wäre der Halo nicht vollkommen kugelförmig, sondern etwas abgeflacht, würde er auf die Bahnen der Sterne im Strom eine Drehkraft ausüben und sie deutlich von einem Großkreis ablenken. Wie sich zeigt, sind die Ströme sehr dünn und bilden fast perfekte Großkreise um die Milchstraße. Computersimulationen von Ibata sprechen darum für eine annähernd sphärische Verteilung der Dunklen Materie; dennoch könnte sie ein klein wenig ungleichmäßig sein, wie beispielsweise Saha annimmt.

Die versteckten Zwerge

Nicht nur die Zerstörung der Zwerggalaxien wirft Fragen auf, sondern auch ihre Entstehung. Nach den heutigen theoretischen Modellen beginnen Galaxien als Ansammlungen Dunkler Materie, die dann Gas und Sterne anziehen und so sichtbar werden. Der Vorgang erzeugt nicht nur große Galaxien wie unsere Milchstraße, sondern auch zahlreiche kleine. Nun sagen die Simulationen zwar deren Eigenschaften halbwegs richtig voraus, ergeben aber viel mehr solche Zwerggalaxien, als bisher beobachtet wurden. Was ist der Grund?

Einen Teil der Antwort liefern neue Analysen des Sloan Digital Sky Survey, einer systematischen Durchmusterung eines Viertels des Sternenhimmels. Dabei wurde rund ein Dutzend neuer, extrem schwach leuchtender Galaxien gefunden, die um die Milchstraße ziehen. Ihre Entdeckung war eine Überraschung, denn der Himmel wird seit Langem so gründlich durchsucht, dass Galaxien auf unserer kosmischen Türschwelle doch wohl kaum unentdeckt bleiben konnten. Aber diese ultraschwachen Zwerge enthalten manchmal nur ein paar hundert Sterne. Sie sind so schwach und diffus, dass sie auf normalen Aufnahmen nicht erscheinen; erst spezielle Methoden der Datenverarbeitung halfen, sie zu identifizieren.

Hätte der Sloan Survey den gesamten Himmel erfasst, ließen sich darin vielleicht weitere 30 bis 40 ultraschwach leuchtende Galaxien entdecken. Doch auch das würde nicht erklären, warum so viele Zwerge »fehlen«. Darum suchen die Astronomen nach anderen Möglichkeiten. Gibt es viele solcher Galaxien, die für heutige Teleskope zu weit entfernt liegen? Der Sloan Survey vermag derartige Zwerge nur bis zu ei-

ner Entfernung von 150 000 Lichtjahren aufzuspüren. Erik Tollerud von der University of California in Irvine nimmt an, dass rund 500 unentdeckte Galaxien die Milchstraße umkreisen – in Abständen von bis zu einer Million Lichtjahren vom Zentrum. Sie werden vielleicht mit einem neuen optischen Fernrohr gefunden, dem Large Synoptic Survey Telescope; es erfasst ein achtmal größeres Gebiet als das Sloan-Teleskop. Der Bau dieses Observatoriums begann im März 2011; gegen 2020 soll es den Betrieb aufnehmen.

Eine andere Hypothese besagt, dass um die Milchstraße Galaxien kreisen, die noch trüber sind als die schwächsten bisher nachgewiesenen Zwerge und vielleicht überhaupt keine Sterne enthalten. Sie bestünden fast nur aus Dunkler Materie. Solche Objekte sind nur sichtbar, wenn sie zudem auch Gas enthalten. Dieses wäre so diffus, dass es nur sehr langsam abkühlt – zu langsam, um Sterne zu bilden. Radioteleskope, die große Himmelsbereiche durchmustern, könnten das Gas dennoch entdecken.

Falls diese Galaxien jedoch überhaupt keine normale Materie enthielten, würden sie sich nur indirekt verraten: durch ihre Gravitationswirkung. Durchquert eine solche dunkle Galaxie die Scheibe der Milchstraße, stört sie – wie ein in einen stillen Teich geworfener Stein – die Geschwindigkeitsverteilung von Gas und Sternen. Leider wäre der Effekt sehr klein und von anderen Phänomenen kaum zu unterscheiden; denn alle Spiralgalaxien weisen in ihren Scheiben aus atomarem Wasserstoff Störungen auf, die Wellen auf rauer See gleichen.

Falls die dunkle Galaxie genügend Masse hat, lässt sich ihr Durchgang mit einer unter anderem von Sukanya Chakrabarti von der Florida Atlantic University in Boca Raton und mir ausgeheckten Methode nachweisen. Wie wir kürzlich zeigten, werden die größten Störungen in den Galaxienrändern oft von den Gezeitenkräften vorbeiziehender Galaxien erzeugt. Durch genaue Analyse der Störungen können wir auf Masse und Ort der Eindringlinge schließen. So lassen sich sogar solche aufspüren, deren Masse nur ein Tausendstel der Hauptgalaxie beträgt. Unser Team vermutet, dass sich in der Ebene der Milchstraße eine unentdeckte, möglicherweise dunkle Galaxie verbirgt, die rund 300 000 Lichtjahre vom galaktischen Zentrum entfernt liegt. Nun wollen wir in den vom Spitzer-Weltraumteleskop gesammelten Infrarotdaten nach dieser Galaxie suchen.

Zu wenig Licht

Ultraschwache und dunkle Galaxien sind nicht nur schwer zu finden, sondern geben ein grundlegendes Rätsel auf, das die in ihnen enthaltene Materie betrifft. Normalerweise stellen Astronomen die Menge des in einer Galaxie vorhandenen Materials anhand des Masse-Licht-Verhältnisses dar: die Masse des Materials dividiert durch den Gesamtbetrag des ausgesandten Lichts. Als Norm gilt die Sonne; ihr Masse-Licht-Verhältnis wird als 1 definiert. Da ein durchschnittlicher Stern in unserer Galaxis etwas masseärmer und viel lichtschwächer als die Sonne ist, liegt das gesamte Masse-Licht-Verhältnis der Milchstraße eher bei 3. Unter Einbeziehung der Dunklen Materie springt das gesamte Masse-Licht-Verhältnis auf rund 30.

Josh Simon von der Carnegie Institution in Washington und Maria Geha von der Yale University in New Haven (Connecticut) maßen die Sterngeschwindigkeiten in acht ultraschwachen Zwerggalaxien, um deren Masse zu bestimmen. In manchen Fällen beträgt das Masse-Licht-Verhältnis mehr als 1000 – bei Weitem der höchste jemals beobachtete Wert. Im gesamten Universum liegt das Verhältnis von Dunkler zu gewöhnlicher Materie fast exakt bei 5. Warum ist das Masse-Licht-Verhältnis des Milchstraßensystems so viel größer?

Es gibt zwei Möglichkeiten: Entweder haben Galaxien mit überdurchschnittlichem Masse-Licht-Verhältnis mehr Masse als erwartet, oder sie erzeugen weniger Licht. Die Astronomen glauben, dass Letzteres die Ursache ist. Da Galaxien mit geringerer Masse weniger Schwerkraft haben, verlieren sie mehr von ihrem Gas und leuchten infolgedessen außergewöhnlich schwach. Ein großer Anteil der gewöhnlichen Materie strahlt demnach so geringfügig, dass wir sie nicht sehen. Entweder hat sie sich niemals zu Galaxien und Sternen versammelt, oder sie hat zwar einmal Galaxien gebildet, wurde aber wieder in den intergalaktischen Raum ausgestoßen und ist dort in ionisierter Form für heutige Teleskope unsichtbar (siehe »Die verschwundenen Galaxien« von James E. Geach, Spektrum der Wissenschaft 10/2011, S. 44).

Ironischerweise sind die Astronomen bei der Erforschung unserer Milchstraße auf eine doppelte Unsichtbarkeit gestoßen: Die durch die Dunkle Materie aufgeworfenen Probleme führen zu Überlegungen, in denen Unmengen gewöhnlicher, aber nicht sichtbarer Materie eine Rolle spielen. ~

DER AUTOR

Leo Blitz ist Professor für Astronomie an der University of California in Berkeley und war früher Direktor des dortigen Labors für Radioastronomie.

QUELLEN

Chakrabarti, S. et al.: Finding Dark Galaxies from Their Tidal Imprints. In: Astrophysical Journal (im Druck)
Levine, E. S. et al.: The Vertical Structure of the Outer Milky Way. In: Astrophysical Journal 643, S. 881–896, 2006
Weinberg, M. D., Blitz, L.: A Magellanic Origin for the Warp of the Galaxy. In: Astrophysical Journal Letters 641, S. L33–L36, 2006

WEBLINKS

www.scientificamerican.com/oct2011/blitz
Ein Video zeigt, wie die Magellanschen Wolken zusammen mit Dunkler Materie die Milchstraße deformieren.

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1146808**

Schau nicht so genau hin!

Grob verpixelte Gesichter sind kaum zu erkennen – es sei denn, man vernichtet noch mehr Information.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Manche Dinge lassen sich nur aus der Ferne gesehen ausfinden, und auch das Verkleinerungsglas kann auf Entdeckungen leiten. Das Detail versteckt die großen Züge des Ganzen.

Georg Christoph Lichtenberg (1742–1799)

Schon manch einer, der im westfälischen Münster am Picasso-Museum vorbeispazierte, betrachtete dort verblüfft den Boden. Das triste, graue Pflaster wird von Steinen in zwei unterschiedlichen Farben abgelöst, die seltsam ungeordnet verlegt zu sein scheinen (unten links). Selbst auf den zweiten Blick löst sich das Rätsel nicht ohne Weiteres. Erst wenn man den Platz von einem der oberen Stockwerke des Museumsgebäudes aus betrachtet, erkennt man – Picasso selbst (unten rechts).

Steigt man aber wieder herab und stellt sich erneut vor die Pflasterung, hat man allerdings kaum etwas dazugelernt: Wieder ist das Bild vor lauter Steinen kaum zu erkennen. Was sich aus der Distanz mühelos zu einem klar gezeichneten Gesicht fügt, zerfällt bei geringem Abstand offenbar unvermeidlich in eine lose Ansammlung von Flächen.

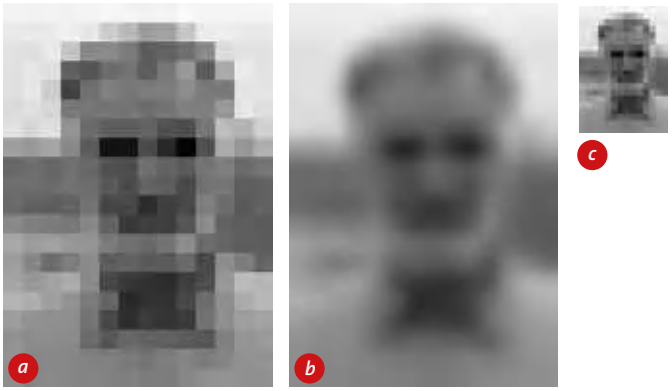
Diese Erkenntnis steht in krassem Gegensatz zu einer schon vom österreichischen Physiker Ernst Mach 1896 aufgestellten These, dass der Mensch einen Gegenstand unabhängig davon, wie groß dieser ist, visuell identifizieren kann. Bei unterschiedlichem Abstand zu einem Objekt ändert sich zwar die Größe seines Abbilds auf der Netzhaut des Auges, trotzdem erkennen wir stets denselben Gegenstand. Der gesunde Menschenverstand hält es ebenfalls mit Mach: Wieso soll ein Gesicht anders erscheinen, wenn man es aus einem Meter oder eben aus zehn Meter Entfernung betrachtet?

Das nebenstehende Porträt (rechte Seite, Bild a) setzt sich aus 14 mal 20 quadratischen Pixeln mit unterschiedlichen Grauwerten zusammen. Erkennen Sie das Gesicht? Aus der Nähe ist das fast nicht möglich. Erst wenn Sie das »versteckte« Gesicht aus einigen Metern Entfernung betrachten, tritt es zu Tage. Wider Erwarten hängt der Effekt nicht einmal davon ab, wie gut Sie die abgebildete Person kennen. Denn auch das Porträt eines Ihnen vertrauten Menschen wird Ihnen völlig fremd werden, wenn Sie es mit einer Bildsoftware auf wenige Pixel herunterskalieren.

Ein vergleichbares Verfahren namens »block masking« oder Blockmaskierung war erstmals 1973 von Leon D. Harmon und Béla Julesz ersonnen worden. Die Wissenschaftler der Bell Labs in New Jersey gingen davon aus, dass einem Betrachter schon wenige charakteristische Stellen eines Gesichts genügen, damit er es erkennen kann. Über ein Porträt legten sie ein quadratisches Gitternetz und ermittelten für jedes Quadrat dessen mittlere Helligkeit. Als Nächstes identifizierten sie die Graustufe, die dieser Helligkeit entsprach, und füllten das Quadrat gleichmäßig damit. So ersetzten sie das Bild nach und nach durch wenige Quadrate unterschiedlicher Grauwerte. Berühmt wurde das nach dieser Methode »verpixelte« Porträt von Abraham Lincoln, wie es auf den amerikanischen Fünf-Dollar-Scheinen abgebildet ist.

Von der Treppe aus, die ins Kunstmuseum Pablo Picasso Münster führt, fällt der Blick der Besucher auf den Picassoplatz. Zu sehen ist dort eine scheinbar ungeordnete Ansammlung farbiger Pflastersteine. Das Anlitz des Meisters erkennt erst, wer aus einem höheren Stockwerk herabblickt.

ALLE FOTOS: H.-J. SCHLICHTING



Per Blockmaskierung lassen sich Fotos von Gesichtern radikal »verpixeln« (a) und dadurch unkenntlich machen. Dazu wird in je einer quadratischen Zelle des darübergelegten Gitters die mittlere Helligkeit ermittelt, dann wird die Zelle durch ein entsprechendes Grau ausgefüllt. Um das Gesicht wieder erkennbar zu machen, kann man die Kanten zwischen den Pixeln verwischen (b), oder aber man betrachtet das verpixelte Bild aus größerer Entfernung, was äquivalent zu einer verkleinerten Darstellung ist (c).

Während der Arbeit wurde den beiden klar, dass ein Betrachter ihrer Pixelbilder dem Erkennen nachhelfen konnte – nicht, indem er genauer hinsah, sondern im Gegenteil, indem er schielte, blinzelte, defokussierte oder den Kopf schnell hin- und herbewegte. Oder er wandte den Trick an, der schon Picasso zum Vorschein brachte, vergrößerte also den Abstand zum Bild. Wie kommt es, dass die Formen eines Gesichts in der Unschärfe plötzlich deutlich hervortreten, während sie sich einem noch so scharfen Blick entziehen?

Pixeln, bis das Bild »kippt«

Harmon und Julesz zufolge nimmt – vereinfacht dargestellt – das visuelle System des Menschen unterschiedliche Strukturelemente über verschiedene Informationskanäle wahr. Grobe und feine Strukturen eines Bilds erreichen uns demzufolge durch je einen eigenen Kanal. Was bedeutet dies für Gesichter? Es entspricht dem physiologischen Befund ebenso wie der Erfahrung, dass wir bekannte Gesichter bereits aus großer Entfernung an ihrer Grobstruktur erkennen, selbst wenn wir noch keine Details unterscheiden können. Umgekehrt bedeutet dies: Wenn wir ein Porträtbild in grobe Pixel umwandeln und dadurch die Details auslöschen, dürfte sich an seiner bloßen Erkennbarkeit nichts ändern.

Bis zu einer gewissen Pixelgröße ist das tatsächlich der Fall. Jenseits dieser Grenze kippt das Bild aber, und das Gesicht zerfällt in eine Ansammlung grauer Blöcke. Der Wechsel kommt dadurch zu Stande, dass die Wahrnehmung zunehmend durch die scharfen Kanten zwischen den Blöcken dominiert wird. Denn der Kanal für Details registriert nun nicht mehr die Einzelheiten des ursprünglichen Bilds, die ja herausgemittelt wurden, sondern vor allem die für das Gesicht völlig uncharakteristischen Kanten. Ab einer gewissen Pixelgröße springen sie so sehr ins Auge, dass sie all das unkenntlich machen, was uns über den Kanal für Grobstrukturen erreicht.

Erst wenn man die scharfen Kanten mit einer Software wieder herausfiltert (b), tritt eine ähnliche Wirkung wie beim unscharfen Betrachten ein: Die Kanten verschwinden, und das vergröbert dargestellte Gesicht wird wieder erkennbar. Kaum zu glauben, dass Bild (b) durch weitere Vernichtung von Information aus (a) hervorgegangen ist.

Verglichen mit den Fotos oben weist der »versteckte Picasso« übrigens Besonderheiten auf. Die Zahl der Graustufen ist auf ein Minimum, nämlich auf zwei, reduziert. Das erschwert das Erkennen, ebenso wie die perspektivische Verzerrung, die erst von einem höheren Stockwerk aus weit gehend aufgehoben wird. Andererseits sind die einzelnen Blöcke nicht so groß, die Verpixelung ist also weniger grob.

Eingesetzt wird das Phänomen vor allem in der Kunst. Schon die prächtigen Mosaiken der Antike kann man als Blockmaskierung auffassen. Aus der Nähe betrachtet lösen sie sich ebenfalls in farbige Fragmente auf. Aus der Entfernung, aus der ohnehin die meist großen Kunstwerke erst überblickt werden können, verschmelzen die Fliesen zu einem »Gemälde«. In neuerer Zeit waren es die Pointillisten, welche die Wirkung der Unschärfe in ihren Werken einkalkulierten. Deren Hauptvertreter Georges Seurat trug punktförmige Tupfer mit möglichst reinen Farben penibel rasterartig auf. So nebeneinandergesetzt überzogen sich die Farben mit einem komplementärfarbigen Schimmer der Nachbarfarbe. Der Farbeindruck ergab sich erst beim Sehvorgang des Betrachters: Die Farbe mischte sich sozusagen optisch, nicht auf der Palette oder auf der Leinwand.

»Schau doch genauer hin!«, sagen wir gelegentlich zu Menschen, die eine entscheidende Information übersehen haben. Überraschenderweise können Details aber auch stören. Dann ist mit diesem Rat niemandem geholfen, und es muss vielmehr heißen: »Schau nicht so genau hin, dann wirst du es schon erkennen!« ~

DER AUTOR

H. Joachim Schlichting war bis 2011 Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. 2008 erhielt er für seine didaktischen Konzepte den Pohl-Preis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.

QUELLE

Harmon, L. D.: The Recognition of Faces. In: Scientific American, S. 70–82, November 1973

LITERATURTIPP

Schlichting, H.J.: Wenn der Pool ins Schwimmen gerät. Primus, Darmstadt 2012
Physikalische Alltagsphänomene anschaulich erklärt

Das Leuchten des Heiligenscheins

Glorien zählen zu den schönsten atmosphärischen Phänomenen, sind aber lange rätselhaft geblieben. Nun trug überraschend der optische Tunneleffekt zu ihrer Erklärung bei. Forscher haben dabei auch gelernt, den Einfluss von Wolken auf den Klimawandel besser vorherzusagen.

Von H. Moysés Nussenzveig

Wenn Sie das nächste Mal eine Flugreise unternehmen, machen Sie doch mal ein kleines Experiment. Wählen Sie einen Fensterplatz, von dem aus Sie den Schatten des Flugzeugs auf den Wolken sehen können. Dafür müssen Sie herausfinden, wie die Sonne während des Flugs relativ zum Flugzeug steht. Wenn Sie Glück haben, belohnt Sie eine der schönsten atmosphärischen Erscheinungen für die Mühe: ein mehrfarbiger Strahlenkranz, der den Schatten des Flugzeugs auf der Wolkenoberfläche umgibt. Auch Bergsteiger können dieses Glorie oder Gloriole genannte Phänomen gelegentlich sehen. Erreichen sie bei Sonnenaufgang einen leicht in Wolken gehüllten Berggipfel, erscheint um den Schatten ihres Kopfs auf den nahen Wolken ebenfalls ein leuchtender Heiligenschein.

Die erste Beschreibung einer Glorie veröffentlichte 1748 ein französisches Expeditionsteam. »Eine Wolke, die uns umhüllt hatte, löste sich auf und ließ die Strahlen der aufgehenden Sonne hindurch«, berichteten die Mitglieder der wissenschaftlichen Entdeckungsreise über Beobachtungen, die sie ein Jahrzehnt zuvor auf dem Gipfel des Pambamarca im heutigen Ecuador gemacht hatten. »Dann sah jeder von uns seinen auf die Wolke fallenden Schatten … und das Erscheinen eines Halos oder einer Glorie um den Kopf, bestehend aus drei oder vier konzentrischen Ringen in sehr hellen Farben … Das Überraschendste daran war, dass jeder der sechs oder sieben Anwesenden das Phänomen nur um den Schatten seines eigenen Kopfes sah und nicht um die Köpfe der anderen.«

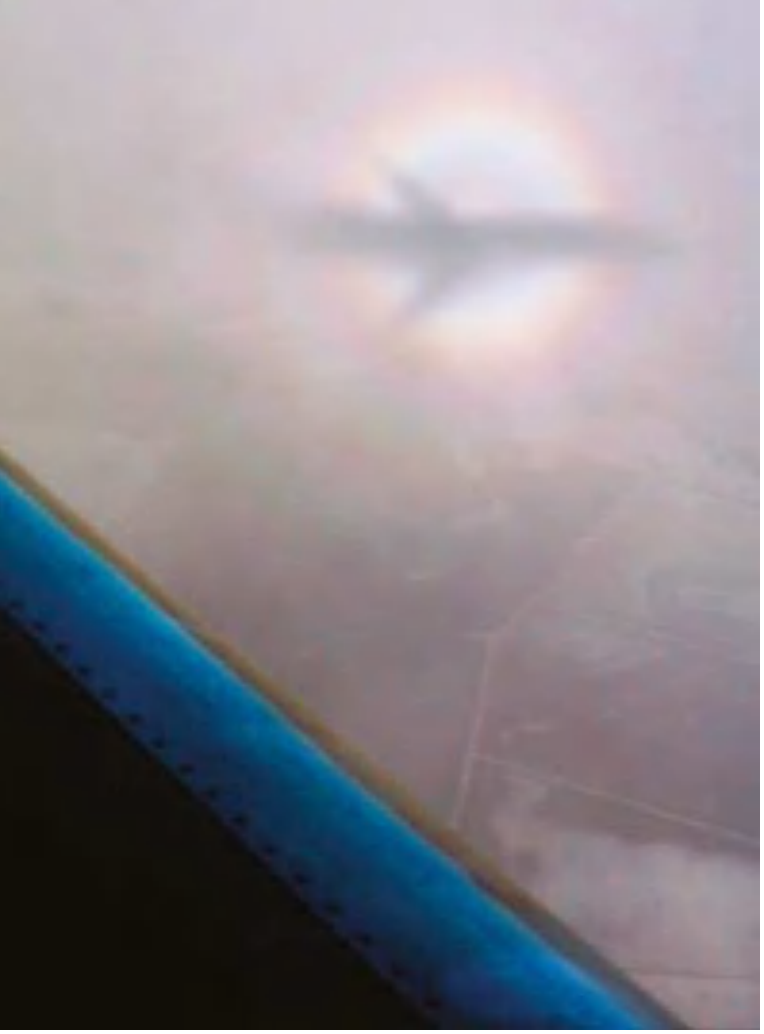
Auch wenn dieser Gedanke naheliegt: Für die Entstehung einer Glorie spielt der Schatten des Beobachters (oder des Flugzeugs) gar keine Rolle. Glorie und Schatten treffen nur deshalb zusammen, weil sie beide entgegengesetzt zur Sonne liegen. Das gibt uns einen ersten Hinweis auf die Natur von Glorien: Es muss sich um einen Effekt handeln, bei dem das Sonnenlicht um nahezu 180 Grad in seine Ursprungsrichtung zurückgestreut wird. Außerdem haben offenbar Wolken eine wichtige Funktion.

Man sollte denken, dass eine solche Erscheinung, die das altehrwürdige Gebiet der Optik betrifft, restlos aufgeklärt ist. Doch weit gefehlt. Für Wissenschaftler stellt dieses »Phänomen, das so alt sein muss wie die Welt«, wie es im Bericht von 1748 hieß, seit Jahrhunderten eine Herausforderung dar. Schließlich ist schon die physikalische Erklärung eines Regenbogens erheblich schwieriger, als uns viele Lehrbücher weismachen wollen – und der ist trotz mancher Ähnlichkeit mit einer Glorie viel einfacher zu verstehen.

Im Lauf der Jahrhunderte haben Forscher viele unterschiedliche Erklärungen angeboten, die sich aber allesamt als falsch herausgestellt haben. So schlug der deutsche Physiker Joseph von Fraunhofer Anfang des 19. Jahrhunderts vor, dass Sonnenlicht, welches an Tröpfchen tief im Inneren einer Wolke zurückgestreut wird, an anderen Tröpfchen in den äußeren Wolkenschichten erneut gebeugt wird.

Das Phänomen der Beugung folgt aus der Wellennatur des Lichts. Es erlaubt dem Licht, »um die Ecke zu gehen«, ähnlich, wie Meereswellen um kleine Inseln herumwandern und sich dahinter wieder so ausbreiten, als ob die Hindernisse gar nicht existierten. Fraunhofer vermutete, dass eine solche doppelte Streuung farbige Beugungsringe erzeugen könnte. Sie würden dem so genannten Hof ähneln, der gelegentlich nachts auf Wolken auftritt, die nahe der Sichtlinie zum Mond liegen. Erst 1923 konnte der indische Physiker Bidhu Bhusan Ray Fraunhofers Vorstellungen widerlegen. Bei seinen Experimenten mit künstlichen Wolken stellte Ray fest, dass sich Helligkeit und Farben in Glorien anders verteilen als in Mondhöfen. Er wies auch nach, dass Glorien direkt in den äu-

Der vermeintliche Heiligenschein, den Flugreisende (Foto oben links) ebenso wie Bergsteiger unter bestimmten Umständen entdecken können, scheint exakt den jeweils eigenen Schatten zu umgeben. Beide Phänomene entstehen auf Wolken, die von der schräg stehenden Sonne beschienen werden.



LINKS: STEVE JURVETSON; RECHTS: CLAUDIA HINZ

LINKS: BARBARA LAUGHON; RECHTS: CLAUDIA HINZ

ßeren Schichten der Wolken entstehen, und zwar durch jeweils einen einzigen Streuvorgang an einem Tropfen.

Ray versuchte, die Rückstreuung mit Hilfe der geometrischen Optik zu fassen. Diese beschreibt Licht nicht durch Wellen, sondern durch gerade Strahlen. Trifft ein Lichtstrahl auf eine Grenze zwischen zwei Medien – zum Beispiel auf die Tröpfchenoberfläche, an der sich Wasser und Luft berühren –, so dringt ein Teil des Lichts hindurch, während der andere Teil reflektiert wird. Das hindurchgehende Licht knickt dabei leicht ab, es wird »gebrochen«, wie Physiker sagen. Innerhalb des Wassertropfens wird es ein oder mehrere Male an der Tropfenoberfläche reflektiert, bevor es wieder austritt. Doch selbst wenn Ray mehrfache Reflexionen berücksichtigte, waren die entstehenden Effekte viel zu schwach, um Glorien zu erklären.

»Es ist sehr schön, dass der Computer das Problem versteht. Aber ich würde es auch gern verstehen«

Eugene Wigner, Physik-Nobelpreis 1963

Eine umfassende Beschreibung muss daher über die geometrische Optik hinausgehen. Diese ist historisch mit der Vorstellung von Licht als Teilchen verknüpft. Doch sie vernachlässigt dessen Wellennatur und damit insbesondere Effekte wie die Lichtbeugung. Dabei kann man leicht erkennen, dass es sich bei Glorien um Beugungsphänomene handelt. Im Gegensatz zur Brechung wird die Beugung nämlich stärker, wenn die Wellenlänge wächst. Darum ist der innere Ring einer Glorie blau und der äußere rot, was kürzeren beziehungsweise längeren Wellenlängen entspricht.

Im Prinzip lassen sich sowohl Regenbögen als auch Glorien mit einer Anfang des 20. Jahrhunderts entwickelten Standardtheorie der Optik erklären. Damals fand der deutsche Physiker Gustav Mie eine exakte mathematische Lösung für das Problem der Lichtstreuung an Wassertropfen. Doch der Teufel steckt im Detail. Die Mie-Theorie basiert auf der Überlagerung so genannter Teil- oder Partialwellen. Um ein Ergebnis für ein bestimmtes Problem zu erhalten, muss ein Forscher im Prinzip unendlich viele Partialwellen addieren. In der Praxis ist das natürlich nicht möglich – meist aber auch gar nicht nötig, da nur eine endliche Anzahl von Wellen signifikant zu einem optischen Phänomen beiträgt. Trotzdem müssen noch Hunderttausende von mathematischen Ausdrücken berechnet werden, von denen schon jeder für sich ziemlich kompliziert ist.

Füttert man die Gleichungen in einen Computer, so erhält man zwar die richtige Lösung, versteht aber noch nicht die physikalischen Effekte, die für das Phänomen verantwortlich sind. Die Mie-Theorie ist also eine Art mathematischer »Black Box«, oder, wie es der Nobelpreisträger Eugene Wigner formulierte: »Es ist sehr schön, dass der Computer das Problem versteht. Aber ich würde es auch gern verstehen.«

Ein wenigstens teilweise korrekter Einblick in die Physik der Glorien gelang erstmals Mitte des 20. Jahrhunderts. Hendrik C. van de Hulst, ein Pionier der modernen Radioastronomie, konnte zeigen, dass ein Lichtstrahl, der nahe am Rand in einen Tropfen eindringt, darin einen v-förmigen Weg nimmt (siehe Grafik 1 auf S. 56). Der Strahl wird an der Rückseite des Tropfens reflektiert und verlässt ihn nahezu in derselben Richtung, aus der er gekommen ist. Da die Wassertröpfchen in Wolken sehr klein sind, sind sie fast exakt kugelförmig. Auf Grund der Kugelsymmetrie verhalten sich in einem Bündel von Sonnenstrahlen, die auf einen Tropfen treffen, alle Strahlen, die denselben Abstand vom Tropfenmittelpunkt besitzen, in derselben Weise. Dieser Bündelungseffekt verstärkt die Rückstreuung enorm.

Will man damit Glorien erklären, stößt man allerdings schnell auf ein Problem. Wenn ein Strahl in ein Tröpfchen eindringt und es wieder verlässt, wird er durch die Brechung abgelenkt. Der Brechungsindex von Wasser ist aber nicht groß genug, um einen Lichtstrahl nach einer einzigen inneren Reflexion in die Ausgangsrichtung zurückzulenken. Wasser kann einen Lichtstrahl bestenfalls mit 14 Grad Abweichung in die ursprüngliche Herkunftsrichtung zurückschicken.

1957 hatte van de Hulst dann eine Idee, wie sich diese Lücke von 14 Grad schließen lässt. Er stellte sich vor, das Licht wandere ein Stück weit als Welle über die Oberfläche des Tropfens (siehe Grafik 2 auf S. 56). Oberflächenwellen auf Grenzflächen zwischen zwei Medien können unter unterschiedlichsten Bedingungen entstehen. Ein tangential auf den Tropfen treffender Strahl, so van de Hulsts Idee, breitet sich zunächst ein kurzes Stück auf der Oberfläche aus, dringt dann in den Tropfen ein und trifft von innen auf dessen hintere Begrenzung. Dort reflektiert, erreicht er schließlich wieder den Rand des Tropfens, wandert erneut ein Stück weit als Oberflächenwelle und verlässt schließlich den Tropfen. Ins-

AUF EINEN BLICK

RÄTSELHAFTE GLORIEN

1 Schaut man von einem Berggipfel oder aus einem Flugzeug auf eine Wolke herab, sieht man zuweilen eine **Glorie**: einen mehrfarbigen leuchtenden Ring, der sich um den eigenen Schatten oder um den des Flugzeugs legt. Ähnlich wie bei einem Regenbogen entstehen die Farben durch **mikroskopische Wassertröpfchen** in den Wolken.

2 Doch die Physik einer Glorie ist erheblich komplexer als die eines Regenbogens. Die Lichtenergie des Phänomens stammt laut Forschungen des Autors hauptsächlich vom **optischen Tunneleffekt**: Selbst Licht, das einen Tropfen knapp verfehlt, überträgt Energie auf ihn.

3 Die so gewonnenen Erkenntnisse helfen Klimaforschern bereits heute, in ihren Modellen den **Einfluss von Wolken** auf den Klimawandel besser zu berücksichtigen.

gesamt wird der Strahl dadurch in ebenjene Richtung zurückgeworfen, aus der er ursprünglich gekommen ist.

Zwar können die Oberflächenwellen Energie verlieren, indem sie tangential Strahlung aussenden. Van de Hulst vermutete indessen, dass der Bündelungseffekt diese Dämpfung mehr als kompensiert. Damals existierte allerdings noch kein Verfahren, um den Beitrag der Oberflächenwellen zu berechnen – van de Hulst konnte seine Ideen also nicht überprüfen.

Letztlich müssen alle Informationen über den physikalischen Ursprung der Glorien in den Partialwellen der Mie-Streuung enthalten sein. Die Herausforderung besteht darin, sie daraus zu extrahieren. Denn jede Partialwelle ist eine komplizierte Funktion der Tropfengröße und des Brechungsindex, der die Stärke der Lichtbrechung eines Mediums angibt. Außerdem hängt sie vom so genannten Stoßparameter ab, dem Abstand eines Lichtstrahls vom Tropfenzentrum. Ohne einen Hochleistungscomputer ist es daher kaum möglich, einen realistischen Fall zu berechnen, in dem Mie-Streuung gleichzeitig an vielen Tröpfchen unterschiedlicher Größen stattfindet. Erst ab den 1990er Jahren standen ausreichend schnelle Supercomputer für solche komplizierten Situationen zur Verfügung. Doch selbst diese lieferten keine Erkenntnisse darüber, was bei dem Phänomen wirklich vor sich geht.

Selbst Lichtstrahlen, die ein Tröpfchen verfehlen, steuern Energie bei

Also musste ein anderer Weg beschritten werden. Schon 1965 hatte ich mit einem Forschungsprojekt begonnen, das unter anderem eine vollständige physikalische Erklärung für Glorien liefern sollte. Viel später, im Jahr 1987, stießen Warren Wiscombe vom Space Flight Center der NASA in Maryland und ich auf einen neuen Aspekt der Lichtbrechung: Auch Lichtstrahlen, die ein Tröpfchen knapp verfehlen, können einen signifikanten Beitrag zum gebrochenen Licht liefern (siehe Grafik 3 auf S. 57). Auf den ersten Blick erscheint das absurd. Wie kann ein Tropfen einen Lichtstrahl beeinflussen, der nicht einmal durch ihn hindurchgeht? Doch Wellen, insbesondere Lichtwellen, besitzen eine etwas unheimliche Eigenschaft: Sie können »tunneln«, also eine scheinbar undurchdringliche Barriere eben doch durchdringen.

Denn entgegen einem weit verbreiteten Irrtum ist der Tunneleffekt nicht nur Quantenphänomenen vorbehalten, sondern tritt auch bei klassischen Wellen wie zum Beispiel Licht auf. Issac Newton beobachtete den optischen Tunneleffekt bereits 1675. Als eines der verblüffendsten Phänomene der Physik kommt er derzeit bei neuartigen berührungsempfindlichen Bildschirmen zum Einsatz. Diese erkennen nicht nur den Ort, an dem ein Benutzer sie mit seinem Finger berührt, sondern auch, ob er fest oder leicht auf den Schirm drückt.

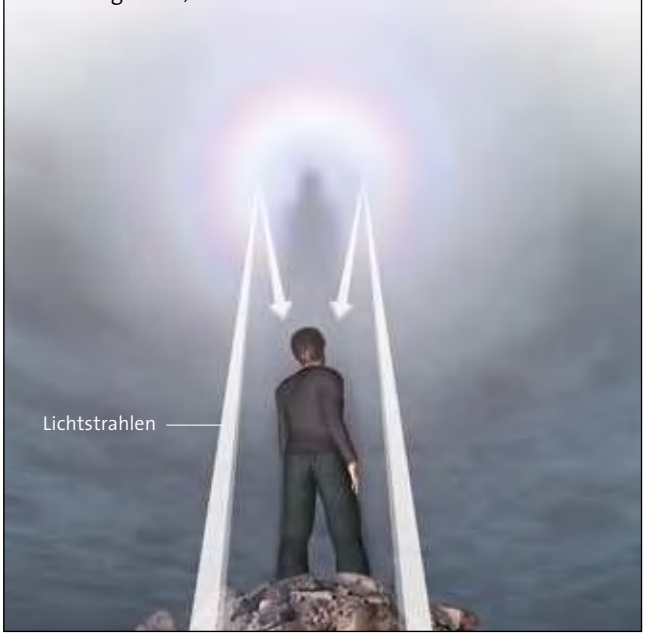
Wenn sich Licht durch ein Medium wie Glas oder Wasser ausbreitet und dann unter ausreichend flachem Winkel auf die Grenzfläche zu einem Stoff mit niedrigerem Brechungsindex trifft, wird es daran vollständig zurückgeworfen. Dieser Effekt sorgt etwa dafür, dass Lichtsignale nicht seitlich aus einem Glasfaserkabel austreten können. In unserem Fall wird ein Lichtstrahl, der von innen auf die Grenzfläche des Tropfens mit der Luft trifft, vollständig ins Tropfeninnere zurückgeworfen. Doch selbst bei Totalreflexion reichen die elektrischen und magnetischen Felder des Lichts im Moment der Reflexion noch ein Stück weit über die Grenzfläche hinaus. Diese Felder bilden extrem schwache »evaneszente« Wellen, die aber die unmittelbare Umgebung der Grenzfläche nicht verlassen und daher keine Energie nach außen tragen.

Nun kommt der Tunneleffekt ins Spiel: Befindet sich ein drittes Medium in so geringem Abstand von der Grenzfläche, dass es mit den evaneszenten Wellen überlappt, dann können die Wellen aus dem Tropfeninneren das zweite Medium – das zuvor als Barriere gewirkt hat – durchtunneln und sich im dritten weiter ausbreiten. Die Wellen tragen jetzt Energie fort und schwächen dadurch die innere Reflexion im Tropfen ab.

Zu einem nennenswerten Tunneleffekt kommt es nur, wenn die Lücke nicht viel größer ist als eine Wellenlänge – im Fall von sichtbarem Licht höchstens etwa ein tausendstel Millimeter. Newton war auf das Phänomen gestoßen, als er

Licht und Schatten

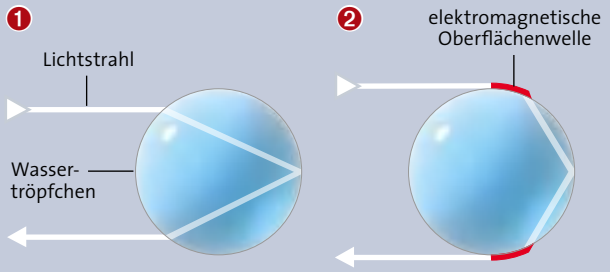
Warum umhüllt eine Glorie stets den Schatten des Beobachters? Das Phänomen beruht auf Licht, das nahezu exakt in die Richtung zurückgeworfen wird, aus der es gekommen ist. Deshalb erfordert seine Beobachtung eine spezielle räumliche Anordnung: Sonne, Beobachter und Wolke müssen auf einer Linie liegen. Daraus ergibt sich unmittelbar, dass eine Glorie als Halo um den Schatten des Beobachters auf der Wolke erscheint. Wie bei einem Regenbogen werden die unterschiedlichen Farben des Spektrums unterschiedlich stark abgelenkt, wodurch ein irisierendes Muster entsteht.



ALFRED T. KAMAJIAN

Licht am Ende des Tunnels

Glorien wurden schon vor Jahrhunderten beschrieben. Doch erst in jüngster Zeit – und nach einigen Fehlversuchen – ist es Physikern gelungen, einen Einblick in die physikalische Ursache der faszinierenden Erscheinung zu erhalten. Sie basiert auf dem so genannten optischen Tunneleffekt.



Drei Erklärungsansätze

1 Falsch
Zunächst haben Forscher versucht, das Phänomen mit der Reflexion von Licht innerhalb mikroskopischer Wassertröpfchen zu erklären. Wolken bestehen aus einer Unzahl solcher Tropfen. Dringen Lichtstrahlen in einen davon ein, werden sie gebrochen, innerhalb des Tropfens zurückgeworfen und erneut gebrochen, wenn sie den Tropfen wieder verlassen. Sie kehren dann – so die Idee – in die Richtung zurück, aus der sie gekommen sind (Grafik 1). Doch Wasser bricht das Licht nicht stark genug, um es exakt in die Herkunftsrichtung zurückzuschicken.

2 besser
Ein zweiter Erklärungsversuch betrachtet Lichtstrahlen, die ein Tröpfchen gerade eben am Rand treffen. Solche Strahlen können elektromagnetische Oberflächenwellen anregen. Diese folgen der gekrümmten Oberfläche des Tropfens ein kleines Stück (stark übertrieben in Grafik 2

Interferenzmuster untersuchte, die man heute als newtonsche Ringe bezeichnet. Er legte eine konvexe Linse auf eine ebene Glasplatte und erwartete, dass sich die Ringe nur zeigen, wenn Licht direkt von der Linse in die Platte eintreten kann. Doch er beobachtete die Muster auch dann noch, als er zwischen Linse und Platte für eine extrem dünne Schicht aus Luft sorgte – als die beiden Oberflächen sich also gerade nicht mehr berührten. Ein wenig von dem Licht, dass eigentlich total reflektiert werden sollte, musste die Lücke überwunden haben.

Wiscombe und ich untersuchten 1987 zunächst den idealisierten Fall einer total reflektierenden Sphäre, beispielsweise eine silberbeschichtete Kugel. Wir fanden heraus, dass Partialwellen eines Strahls, der die Sphäre knapp verfehlt, bis zu ihrer Oberfläche tunneln und so einen signifikanten Beitrag zur Lichtbrechung liefern können. Ist die Sphäre transparent wie etwa ein Wassertröpfchen, kann eine solche Welle sogar in sein Inneres eindringen. Anschließend trifft sie unter einem flachen Winkel von innen auf die Grenzschicht, wird vollständig reflektiert und bleibt in dem Tröpfchen gefangen.

Ein ähnlicher Effekt ist von Schallwellen bekannt. Wendet man sich auf der berühmten Flüstergalerie in der Londoner St. Paul's Cathedral zur Außenwand und sagt einige leise Worte, so kann eine zweite Person auf der entgegengesetzten Seite diese deutlich verstehen. Denn die gekrümmte Wand reflektiert die Schallwellen wieder und wieder und leitet sie so zur anderen Seite.

Im Fall von Lichtwellen in einem Tröpfchen kommt es bei bestimmten Wellenlängen nach mehreren Reflexionen zu einer konstruktiven Interferenz, einer so genannten Mie-Resonanz. Man kann dieses Phänomen mit einer Schaukel vergleichen, die man genau im Rhythmus ihrer natürlichen Schwingungsdauer anstößt, so dass sie höher und höher schwingt. Schon eine winzige Änderung der Wellenlänge reicht aus, um die Resonanzen, die man wegen ihrer Analogie in der Akustik auch als Flüstergaleriemoden bezeichnet, wieder verschwinden zu lassen. Anders gesagt: Mie-Resonanzen sind auf einen sehr kleinen Frequenzbereich beschränkt; in diesem können sie die Intensität aber besonders drastisch verstärken.

Tunneleffekt »sichtbar« und nutzbar gemacht

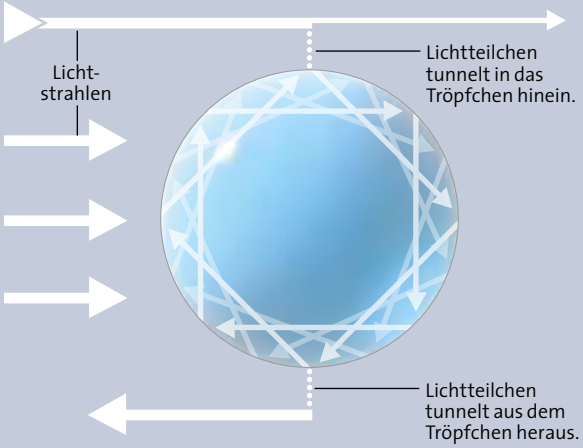
Wir kennen nun also drei Effekte, die zum Phänomen der Glorien beitragen könnten: Strahlen, die auf Tropfen treffen und axial zurückgestreut werden, so wie Ray dies mit den Mitteln der geometrischen Optik beschrieb; nahezu tangential auftreffende Strahlen, die nach van de Hulst Oberflächenwellen hervorrufen; und schließlich Mie-Resonanzen, wie sie durch den optischen Tunneleffekt entstehen. 1977 untersuchte ich zusammen mit Vijay Khrae, damals an der University of Rochester, den Beitrag von tangentialen Strahlen unter Berücksichtigung der Oberflächenwellen. Und 1994 nahm ich mit Luiz Gallisa Guimarães von der Universidade Federal do Rio de Janeiro Resonanzwellen unter die Lupe. Bei einer detaillierten Analyse fand ich dann 2002 heraus, dass sowohl die axiale Rückstreuung als auch die Oberflächenwellen vernachlässigbar sind. Der Hauptbeitrag stammt von Resonanzen infolge des Tunneleffekts. Glorien sind also eine makroskopisch sichtbare Folge des Tunneleffekts von Lichtwellen!

Dieser lässt sich aber auch technisch nutzen. Flüstergaleriemoden finden etwa beim Bau von Lasern Verwendung. Dabei kommen Mikrowassertropfen, Mikrosphären und andere geometrische Formen wie beispielsweise mikroskopische Scheiben aus festen Stoffen zum Einsatz. Bei neuartigen Multitouch-Bildschirmen, die gleichzeitige Berührungen an unterschiedlichen Stellen erkennen, spielt der Finger die Rolle von Newtons konvexer Linse: Licht kann aus dem Bildschirm heraustunneln, vom Finger wieder zurückgestreut werden und so ein Signal auslösen. Durch den Tunneleffekt erzeugte evaneszente Lichtwellen finden außerdem Anwendung in der so genannten Nahfeldmikroskopie. Denn sie lö-

dargestellt), bevor sie in den Tropfen eindringen. Als Nächstes werden sie an der Rückwand des Tröpfchens reflektiert, wandeln sich bei Erreichen der Grenzfläche erneut in eine Oberflächenwelle um und verlassen schließlich den Tropfen. Die Ausbreitung als Oberflächenwelle führt dazu, dass die Ablenkung der Strahlen gerade groß genug ist, um sie exakt in ihre Herkunftsrichtung zurückzuwerfen. Wie sich herausstellte, trägt dieser Effekt aber nur in sehr geringem Maß zur Gesamtenergie einer Glorie bei.

3 GUT
Dank einer von Gustav Mie entwickelten mathematischen Theorie der Lichtstreuung lassen sich Glorien inzwischen korrekt beschreiben – allerdings nur durch umfangreiche Berechnungen, die keinerlei Einblick in die zu Grunde liegende Physik erlauben. Der Autor konnte jedoch zeigen, dass der größte Teil des Lichts einer Glorie durch den so genannten optischen Tunneleffekt zu Stande kommt (Grafik 3). Dabei dringt auch Energie von Lichtstrahlen, die das Tröpfchen knapp verfehlen, in dieses ein. Der Tunneleffekt ist vor allem aus der Quantenphysik bekannt, tritt aber bei klassischen Wellen ebenfalls auf.

3



ALFRED T. KAMAJIAN

sen Einzelheiten auf, die kleiner sind als ihre Wellenlänge, und durchbrechen so die berüchtigte Beugungsgrenze, jenseits deren gewöhnliche Mikroskope nur noch verschwommene Bilder liefern.

Darüber hinaus lässt sich nun die Rolle von Wolken für den Klimawandel besser abschätzen (siehe »Wolken im Klimawandel«, SdW 7/2011, S. 80). Eine wichtige Frage haben die Klimaforscher nämlich noch nicht beantwortet: Was geschieht, wenn sich in Zukunft der durchschnittliche Bewölkungsgrad erhöht? Kühlt dies unseren Planeten, weil mehr Sonnenlicht in das Weltall zurückgestreut wird – oder trägt es im Gegenteil zur Aufheizung bei, weil die Wolken wie eine zusätzliche Schicht wirken, die infrarote Strahlung absorbiert?

Im sichtbaren Spektralbereich ist Wasser mehr oder weniger durchsichtig. In bestimmten infraroten Frequenzbereichen, so genannten Bändern, absorbiert es aber Strahlung, ähnlich wie Kohlendioxid und andere Treibhausgase. Da Mie-Resonanzen gewöhnlich mit langen Wegen und einer großen Zahl interner Reflexionen verknüpft sind, können Wassertröpfchen einen signifikanten Anteil der für das Klima wichtigen infraroten Strahlung absorbieren, insbesondere dann, wenn das Wasser Fremdstoffe enthält und nicht kristallklar ist.

Eine typische Wolke besteht aus vielen Tröpfchen mit ganz unterschiedlichen Durchmessern. Bis vor etwa einem Jahrzehnt haben Forscher bei Mie-Simulationen der Lichtstreuung an Wolken jeweils nur eine relativ kleine Zahl unterschiedlicher Tropfendurchmesser berücksichtigt. Diese Vereinfachung verringerte zwar die notwendige Rechenzeit. Doch sie hat einen unerwarteten Haken, wie ich 2003 mit einer für Regenbögen und Glorien entwickelten Methode zeigte: Die übliche Simulationstechnik führt in schmalen Bändern des Spektrums zu Fehlern von bis zu 30 Prozent. Denn sie kann wichtige Beiträge durch Resonanzen übersehen, die in diesen Bändern auftreten. Werden Berechnungen für Tröpfchengrößen von ein, zwei, drei Mikrometern und so weiter durchgeführt, dann verfehlt das Verfahren die scharfe Resonanz, die bei einer Tröpfchengröße von 2,4 Mikrometern auftritt. Eine Untersuchung, welche die reale Verteilung der Tröpfchengrößen in der Atmosphäre zu Grunde legte, bestätigte 2006 schließlich meine Vorhersage. Seither berücksichtigen die Forscher zunehmend mehr Tröpfchengrößen, um ihre Modelle zu verbessern.

Schon Wigner hatte uns gewarnt: Selbst die Ergebnisse der modernsten Supercomputer können in die Irre führen, wenn man sie ohne ausreichende physikalische Einsicht verwendet. Vielleicht denken Sie ja daran, wenn Sie das nächste Mal im Flugzeug sitzen und eine Glorie erblicken. ~

DER AUTOR

H. Moysés Nussenzveig ist emeritierter Professor für Physik der brasilianischen Universidade Federal do Rio de Janeiro und Träger der Max-Born-Medaille der Optical Society of America. Er hat neue theoretische Verfahren zur Berechnung vieler optischer Phänomene entwickelt. Zurzeit leitet er Studien über die Biophysik von Zellen.

QUELLEN

Nussenzveig, H. M.: Diffraction Effects in Semiclassical Scattering. Cambridge University Press, 1992
Nussenzveig, H. M.: Light Tunneling in Clouds. In: Applied Optics 42, S. 1588–1593, 20. März 2003
Nussenzveig, H. M.: Light Tunneling. Progress in Optics 50. Elsevier, New York 2007
Zender, C. S., Talamantes, J.: Solar Absorption by Mie Resonances in Cloud Droplets. In: Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 98, S. 122–129, März 2006

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1146810**

HEINZPETER ZINOI, MIT FRDL. GEN. VON DOMINIK BONATZ

SÜDOSTASIEN-ARCHÄOLOGIE

Megalithen im Regenwald

Noch vor wenigen Jahrzehnten galten die behauenen Steinkolosse im Hochland von Sumatra als Zeugnisse einer prähistorischen Kultur, die lange vor den prachtvollen Tempelanlagen und Palästen des Tieflands existierte. Jetzt aber haben archäologische Grabungen ergeben: Beide Kulturen standen in engem Austausch, ja hingen sogar voneinander ab.

Von Dominik Bonatz

Goldland, »Suvarna-bhumi«, nannten Indiens Fürsten das zweigrößte Eiland des indonesischen Archipels und prägten damit seinen heutigen Namen: Sumatra. Im 7. Jahrhundert n. Chr. erblühte dort das Königreich Srivijaya. Während zeitgleich im fernen Europa Machtkämpfe das Frankenreich erschütterten und in China die Tang-Dynastie den Thron eroberte, entstanden im Tiefland Sumatras Städte und Tempel. Srivijaya lieferte Gold nicht nur nach Indien, sondern auf dem Seeweg auch den Anrainerstaaten des Persischen Golfs. Dem chinesischen Kaiser überbrachten Gesandtschaften allerlei Kostbarkeiten: Elfenbein, Rhinozeroshorn, Federn des Nashornvogels, Honig, aromatische Tropenhölzer sowie die Duftharze Kampfer und Benzoin, die in Asien eine dem Weihrauch vergleichbare Bedeutung bei rituellen Handlungen hatten.

Macht und Reichtum Srivijayas und seines Nachfolgers Malayu spiegelten sich in prachtvollen Tempelanlagen und Palästen wider. Lange standen deren Überreste im Fokus der Historiker und Archäologen. Erst in den letzten Jahren wurde deutlich, dass sie ein Pendant in den Urwäldern der Gebirge hatten, wenn auch ein weit schlichteres: eine bis heute unbekannte Zahl von behauenen Steinkolossen. Jüngere Grabungskampagnen ergaben, dass diese Megalithen Zeugen eines inselweiten Handelsnetzes sind, das die Grundlage für den Seehandel schuf.

Die Geografie der Insel ist voller Gegensätze (Karte S. 60). Im Westen verläuft die Bergkette des Barisan entlang der gesamten Küste, östlich davon erstreckt sich eine weite, von großen Flüssen durchzogene Ebene bis zum Meer. Um sich gegen die Hochwasser der Regenzeit zu wappnen, lebten die

DREAMSTIME / OKSANA BYELIKOVA

Die Megalithen, die heute im dichten Dschungel des Hochlands von Sumatra verborgen liegen, haben auf den ersten Blick wenig mit den Ruinen der Tempelanlagen und Palästen im Tiefland gemein. Tatsächlich aber waren behauene Steinblöcke wie der im Gebiet des heutigen Kerinci entdeckte (Bild links) wohl das Pendant zu den buddhistischen Tempelanlagen und Palästen der Srivijaya- und der Malayu-Könige, die im Tiefland residierten (rechtes Bild: ein Tempel der in der Malayu-Zeit errichteten Anlage Muara Jambi). Beide Kulturen waren über einen regen Tauschhandel miteinander verbunden – und profitierten so voneinander.

Menschen dort in Pfahlbauten und auf Hausbooten. Problematischer als Überschwemmungen waren die sumpfigen Böden insbesondere der Küstenregion, denn sie eigneten sich nicht für den Anbau von Feldfrüchten. Der Tropenwald des Hochlands hingegen lieferte seinen Bewohnern Baumaterial, Gewürze und andere pflanzliche Produkte. Verschiedene im Gebirge lebende ethnische Gruppen wie die Batak im Norden, die Minangkabau im mittleren Westen und die Rejang im Süden konnten bis heute ihre kulturelle Eigenständigkeit bewahren – dank der schwer zugänglichen Täler und vielleicht auch wegen des Gerüchts, dort lebten Kannibalen.

Während Gruppen von Jägern und Sammlern die Regenwälder durchstreiften, entstanden an den Ufern der Flüsse, weit entfernt von den Mündungssümpfen, erste urbane Zentren, die Gold, Nahrungsmittel, Holz und anderes aus dem Hochland eintauschten. Im Gegenzug lieferten sie Produkte aus Metall, Glas und Keramik, vermutlich auch Textilien und Salz. In Palembang am Unterlauf des Batang Musi regierte die Dynastie der Srivijaya-Könige (Rajas). Sie knüpften ein weit reichendes Netz politischer und wirtschaftlicher Beziehungen, dem sich mehr und mehr Städte und kleinere Königtümer anschlossen. In Stein gemeißelte Sanskritinschriften, die sich bis an die Grenzen zum Bergland finden, berichten über die Schwüre, die diese Vasallen auf Srivijaya leisten mussten. Um ihre Macht zu demonstrieren und um ihr Reich unter dem Dach des Buddhismus ideologisch zu einen, ließen die neuen Herrscher vielerorts Tempelanlagen errichten. Im 9. und 10. Jahrhundert kontrollierten sie die Meeresstraße von Malakka zwischen Sumatra und dem malaiischen Festland – und damit auch den Warenverkehr zwischen Persien und Indien im Westen bis nach China im Osten. Von dort brachten ihre Gesandten Porzellan, Metalle und Seidenstoffe, die dann bis in den Mittelmeerraum weitergehandelt wurden. Fremde Schiffe mussten Zölle entrichten, um die Meeresstraße passieren oder einen der Häfen Sumatras anlaufen zu dürfen.

1025 wurde Palembang von einem indischen Invasionsheer zerstört, und die in Jambi am Fluss Batanghari residierenden Malayu-Könige lösten die Herrscher von Srivijaya als Führungsmacht ab. Doch sie vermochten nicht mehr an den alten Glanz anzuknüpfen, da Teile der Insel bereits an andere Reiche auf der Nachbarinsel Java gefallen waren. Kriegerische Auseinandersetzungen mit diesen Nachbarn schwächten Ma-

AUF EINEN BLICK

STEINZEIT ODER MITTELALTER?

1 Ab dem 7. Jahrhundert n. Chr. war **Sumatra** ein wichtiger **Knotenpunkt im südostasiatischen Handelsnetz**. Die Könige der Srivijaya- und der späteren Malayu-Dynastie unterhielten gute Kontakte bis an den chinesischen Kaiserhof.

2 Unter der holländischen Kolonialherrschaft begannen im 19. Jahrhundert erste archäologische Untersuchungen. Dabei kamen im Hochland Sumatras auch **Megalithen** zum Vorschein. Sie wurden aber als Zeugnisse einer steinzeitlichen Kultur angesehen.

3 Erste Forschungen der letzten Jahre widerlegen diese Einschätzung. Demnach waren die Megalithen zumindest in der Kerinci-Region **Ausdruck eines Tauschhandels** zwischen den Königreichen des Tieflands und den Stämmen des Hochlands.

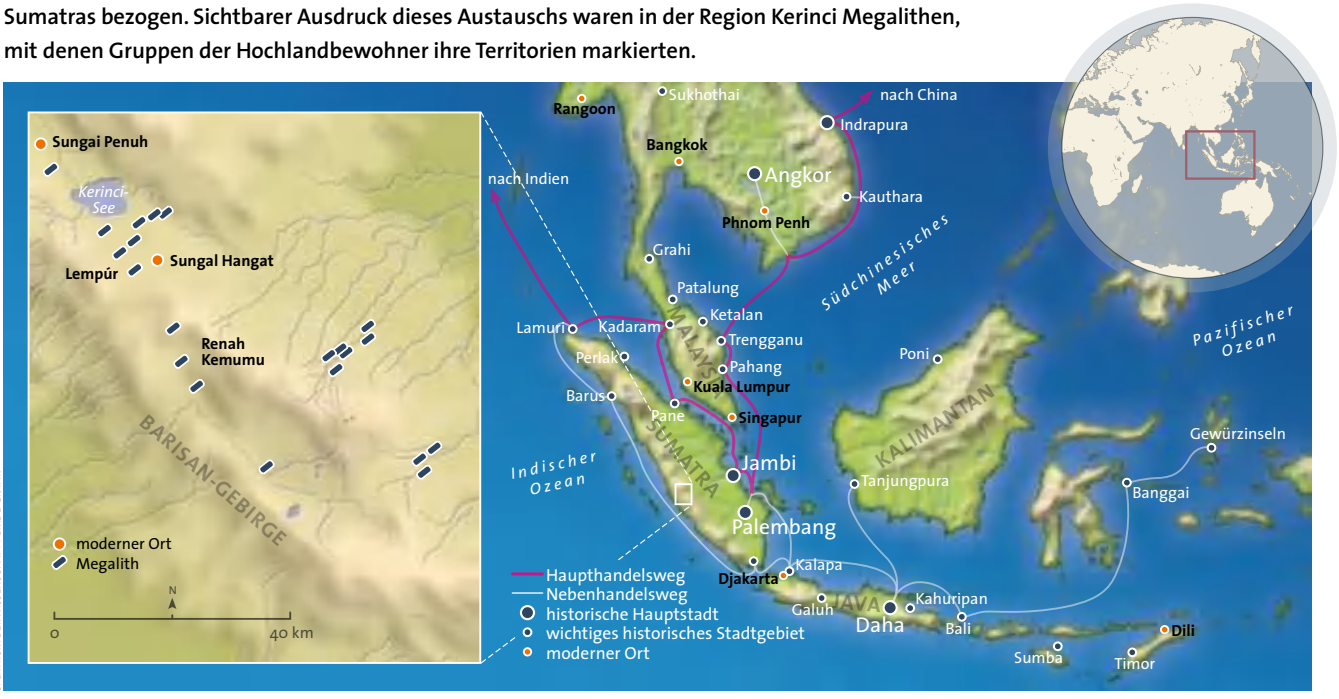
layu, bis es im 14. Jahrhundert seine Eigenständigkeit an Java verlor. In dieser unruhigen Zeit etablierten sich im Norden der Insel zudem einige islamische Sultanate. Ab dem 17. Jahrhundert geriet Sumatra dann immer stärker in den Sog der Kolonisierung. Briten und Niederländer rangen um die lukrative Insel, Letztere obsiegten schließlich im 19. Jahrhundert.

Während nun allenthalben Plantagen den Dschungel verdrängten, befassten sich Europäer erstmals mit den dortigen Altertümern. Der Kolonialbeamte Thomassen à Thuessink van der Hoop veröffentlichte 1932 ein Buch, das die auf dem Pasemah-Plateau in der Provinz Bengkulen entdeckten Megalithen systematisch auflistete und beschrieb. Sieben Jahre später folgte Friedrich M. Schnitgers Buch »Forgotten Kingdoms of Sumatra«. Der aus Österreich stammende Archäologe hatte auf Sumatra im Auftrag der Royal Netherlands Geographical Society Feldforschung betrieben und dabei auch van der Hoops Werk einbezogen. Schnitger und andere Forscher schätzten das Alter der behauenen Steinblöcke auf 3000 bis 4000 Jahre, denn diese wirkten vorzeitlich und erinnerten an jene Dolmengräber, die von Westeuropa bis in die Levante zu finden waren. Altertumsforscher postulierten deshalb eine steinzeitliche Megalithkultur, die im östlichen Mittelmeer aufgekommen und sich ab dem 6. Jahrtausend v. Chr. gen Westen und Osten verbreitet haben sollte. Diese Hypothese war bis Mitte des 20. Jahrhunderts die allgemein akzeptierte Lehrmeinung. Sie hatte leider zur Folge, dass sich Südostasienarchäologen primär mit den leichter zugänglichen Monumenten des Tieflands befassten – die Megalithen betrachteten sie als Angelegenheit für Prähistoriker.

Am 27. Dezember 1949 entließen die Niederlande ihre Kolonien in Indonesien in die Unabhängigkeit (Westneuguinea folgte erst 1962). Von nun an oblag es einheimischen Wissenschaftlern, antike Monumente zu erforschen und zu erhalten. Internationale Kooperationen begannen erst allmählich Ende des 20. Jahrhunderts. Die ersten systematischen Ausgrabungen im Hochland erfolgten dank der Förderung durch die Schweizerisch-Liechtensteinische Stiftung für Archäologische Forschung im Ausland (SLSA).

Die in den verschiedenen Importfunden dokumentierten Verflechtungen mit Südostasien führten mich von meinem ursprünglichen Forschungsfeld, der Vorderasiatischen Archäologie, in das Hochland von Kerinci. Dort leitete ich 2003

Ab dem 7. Jahrhundert kontrollierte das Srivijaya-Königreich auf Sumatra von seiner Hauptstadt im heutigen Palembang aus wichtige Seehandelsrouten; an seine Stelle traten ab dem 9. Jahrhundert die Malayu-Könige in Jambi. Beide Reiche handelten mit Gütern, die sie aus dem Hochland Sumatras bezogen. Sichtbarer Ausdruck dieses Austauschs waren in der Region Kerinci Megalithen, mit denen Gruppen der Hochlandbewohner ihre Territorien markierten.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK

VAN DER HOOP, A.N.J.TH.A.TH.: MEGALITHISCHE OUDHEDEN IN ZUID-SUMATRA. W.J. THIEME & CIE., ZUTPHEN 1932, ILL. 34

Schon 1931 fotografierte und dokumentierte der holländische Kolonialbeamte van der Hoop Steinskulpturen auf dem Plateau von Pasemah. Archäologen erschienen diese aber nicht als lohnende Forschungsobjekte, galten sie doch als Überbleibsel einer steinzeitlichen, von Südostasien bis nach Europa reichenden Megalithkultur.

bis 2008 ein Projekt, an dem Kollegen aus Jakarta, Palembang und Jambi beteiligt waren; ihm folgte ab 2010 eine von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderte Untersuchung in dem weiter nördlich gelegenen Minangkabau-Hochland (siehe Kasten S. 64). Gut 70 Jahre nach van der Hoop befassten sich damit erstmals wieder Altertumsforscher mit den Megalithen Sumatras.

Der Name Kerinci steht für eine Region im gebirgigen Westen. Am Rand einer fruchtbaren Hochebene liegt der gleichnamige See, südlich davon erstrecken sich schwer erreichbare Täler, die zu einem der letzten großen Regenwälder Sumatras gehören, einem weitläufigen Naturschutzgebiet. Dort leben etliche vom Aussterben bedrohte Tierarten wie Sumatra-Tiger und -Nashorn. Ausgrabungen und systematische Geländebegehungen (Surveys) erfolgten von unterschiedlichen Standorten aus. Während wir zu Orten südlich des Sees mit Fahrzeugen gelangten, ließ sich das Serampas-Gebiet nur in ein- bis zweitägigen Fußmärschen erreichen. Einheimische Träger transportierten Gerätschaften sowie die Ausrüstung für fünf bis sechs Personen, die einen mehrwöchigen Aufenthalt in einer der entlegensten Dschungelregionen Sumatras planten. Endpunkt dieser für Europäer eindrucksvollen, aber auch strapaziösen Dschungeletappe war das Dorf Renah Kemumu (siehe Bild S. 63 oben), wo unser Team Jahr für Jahr gastliche Aufnahme fand. Seine gut 400 Einwohner leben am Rand der Illegalität, da seit der Ausweisung ihres ursprünglichen Lebensraums als Naturschutzgebiet, dem 1990 eröffneten Kerinci Seblat National Park, jegliche Siedlungsaktivitäten offiziell untersagt sind. Bislang konnte sich das Dorf allen Umsiedlungsbestrebungen widersetzen. Die archäologischen Reste einer weit zurückreichenden Vergangenheit lieferten ihnen ein Argument, da sie eine Siedlungstradition an diesem Ort bestätigen.

Die vielfältige Megalithkultur Indonesiens

Pro Kampagne unterstützten durchschnittlich 25 Arbeiter die Ausgrabungen in der Umgebung des Dorfs, eine davon in unmittelbarer Nähe eines bei Feldarbeiten entdeckten Megalithen (siehe Bild S. 63 unten). Andere Mitarbeiter des Forschungsteams erkundeten gemeinsam mit einheimischen Führern das Gebiet. Dabei folgten sie beispielsweise Gerüchten um mystische Steine, die sich mitunter tatsächlich als Megalithen herausstellten.

Wir kartierten im Lauf der Kampagnen 21 dieser Monumente, von denen zuvor nur wenige bekannt und in offiziellen Verzeichnissen aufgeführt waren; etliche mehr dürften noch im Urwald verborgen sein. Die meisten Megalithen Sumatras und anderer Inseln Indonesiens stehen aufrecht und bilden Gruppen aus einigen wenigen bis zu mehreren hundert Exemplaren wie etwa auf der Insel Nias (siehe Bild S. 62 oben). Dagegen sind die Steine der Kerinci-Region ohne Ausnahme Einzelgänger und wurden zudem niemals aufgestellt, sondern liegend installiert.

Ihre Grundform ist konisch oder zylindrisch, wobei sie eine Länge von bis zu 4,5 Meter und einen Durchmesser von gut einem Meter erreichen. Auf den Oberflächen und trommelförmigen Enden entdeckten wir häufig Flachreliefs mit figürlichen oder geometrisch-floralen Darstellungen. Im Un-

Der Brauch, Megalithen zu errichten, war in Indonesien weit verbreitet. Meist wurden sie in Gruppen aufgestellt, wie die menschen- und pfeilerförmigen Steine auf der Insel Nias (Foto oben) oder der Megalith aus dem Mahat-Tal im Minangkabau-Hochland Sumatras (links). Aus der Region Pasemah stammt der liegende »Elefantenstein« (unten links), dessen plastisches Relief einen Krieger zeigt, der sich an den Ohren eines Elefanten festhält (hier nicht zu erkennen: Er trägt eine so genannte Kesseltrommel auf dem Rücken). Die Megalithen der Kerinci-Region hingegen wurden einzeln und liegend gesetzt (Foto unten rechts), sie weisen oft nur abstrakte Flachreliefs auf, wie dieses bei Pondok entdeckte Exemplar (Linien mit Kreide nachgezogen).

ALLE FOTOS DIESER DOPPELSEITE: DOMINIK BONATZ

terschied dazu zieren Steine im Gebiet um Pasemah in Südsumatra zum Teil detailliert gearbeitete, aus dem Stein herausgearbeitete plastische Darstellungen. Die Minangkabau wiederum formten Pfeiler mit gekrümmtem Kopfende aus den Rohlingen (siehe Foto links, Mitte).

Auch hinsichtlich der mutmaßlichen Funktion zeigen sich Unterschiede. Die letztgenannten Megalithen markierten Begräbnisstätten. Ihre Form wurde später in der islamischen Zeit Sumatras bei Grabsteinen beibehalten. Das Volk der Toraja auf Sulawesi errichtet sogar heute noch Steine im Rahmen von Totenritualen, weshalb ihre Zahl an einem entsprechenden Kultplatz ständig zunimmt.

Die Megalithen in Kerinci waren offenbar etwas Besonderes, da sie stets solitär auftraten, meist an exponierten Stellen wie Bergrücken oder Talrändern. Archäologische Grabungen in ihrem unmittelbaren Umfeld brachten Scherben von Tongefäßen, Klingen aus Obsidian und Metallfragmente zum Vorschein, zudem Vertiefungen, in denen wohl einst Pfosten steckten. Da im Forschungsgebiet nach wie vor Pfahlhäuser gebaut werden, können wir aus deren Konstruktion auf die vor gut 1000 Jahren in dieser Region gebräuchlichen Techniken schließen (siehe Bilder S. 64 und 65 oben). Die Pfosten mussten witterungsbeständig sein, da sie in die Erde gerammt wurden und nicht auf Steinfundamenten aufsaßen, die Feuchtigkeit ferngehalten hätten. Als Baumaterial kommen deshalb theoretisch Eisenholz und Bambus in Frage. Letzterer ist allerdings weniger belastbar, was durch eine größere Zahl von Stützen hätte ausgeglichen werden müssen. Die Zahl der Eintiefungen und ihr Abstand zueinander zeigen, dass wohl meist Eisenholz verwendet worden ist.

Ackerbau im Dschungel

In Pondok südlich des Kerinci-Sees belegen zwei Pfostenlöcher, die der Langseite eines Hauses vorgelagert waren, dass es dort einen speziellen Eingangsbereich gegeben haben muss. In einer Eintiefung in der Hausmitte entdeckten wir zudem ein Gründungsopfer: ein Tongefäß mit über 600 Glasperlen und einem eisernen Messer. Auch hier lässt sich eine Brücke in die Gegenwart schlagen: Opfergaben unter dem zentralen Hauspfosten sollen heute noch Ahnen oder Geister wohlgesinnt stimmen.

Die für das Hochland Sumatras typischen Reisfelder kamen erst im 18. Jahrhundert im Zuge der Kolonisierung auf. Umweltstudien zufolge wurden bis dahin durch Brandrodung Gärten für den Anbau von Feldfrüchten, vor allem von Knollengewächsen wie Taro oder Yams, angelegt, wie es in entlegeneren Regionen Kerincis nach wie vor üblich ist. Dass es in der Vergangenheit nicht anders war, zeigen Keramikfunde, die bei unseren Begehungen im Dschungel zu Tage kamen. Weil die Bauern sehr weite Wege zu ihren Feldern zurücklegen müssen, bleiben sie dort häufig für mehrere Tage und errichten Hütten. Nach zwei bis drei Jahren überlassen sie die Äcker wieder dem Dschungel, denn die Landwirtschaft laugt die Böden aus und der Ertrag sinkt. Diese Form der Feldwirtschaft verlangte eine mobile Lebensweise, bei der das Dorf zwar den Mittelpunkt einer Lebensgemeinschaft bildete, der Nahrungserwerb jedoch teilweise fernab davon erfolgte. Die Vielzahl kleinerer, durch einfache Gebrauchskeramik gekennzeichneter Fundplätze entspricht also Siedlungskammern, das heißt von den Wäldern abgrenzbaren Bereichen menschlicher Aktivität, die sich nach den naturräumlichen Gegebenheiten richteten. Nun wird auch die Funktion der Megalithen verständlich: Sie markierten den Mittelpunkt einer solchen Kammer und unterstrichen die Bedeutung des zugehörigen Dorfes.

Ihre bislang gültige Datierung beruhte einzig auf ihren Ähnlichkeiten zu Monumenten des Mittelmeerraums und Westeuropas aus nachweislich prähistorischer Zeit. Einen

In der Kerinci-Region macht vor allem das Serampas-Tal (Foto oben), das zu einem Nationalpark gehört, jede archäologische Forschung zum Abenteuer. Die alten Siedlungsplätze liegen auf den umliegenden Kuppen, doch im dichten Dschungel lassen sich ihre Spuren vom Stützpunkt im Dorf Renah Kemumu aus (im Hintergrund zu sehen) nur in langen Fußmärschen entdecken. Doch die Mühe lohnt: Auf dem Bukit Batu Larung genannten Hügel, von dem aus das Bild aufgenommen wurde, kam ein weiterer Megalith zum Vorschein (unten). Um seine Funktion zu ergründen, graben die Archäologen mit einheimischen Arbeitern gemeinsam rund um den Stein nach Artefakten.

Ausgrabung am Megalithen von Pondok (im Hintergrund das über dem Stein errichtete Schutzhaus) brachten Pfostenlöcher zu Tage: Offenbar stand dort ein großes Pfahlhaus. Durch Vergleich mit einem in den Ausmaßen ähnlichen heutigen Gebäude (Foto ganz rechts) hat der Ingenieur Zámolyi Ferenc das Haus rekonstruiert (Grafik).

DOMINIK BONATZ

der wenigen Anhaltspunkte für eine realistischere Altersangabe liefern Reliefs auf Steinen aus Pasemah, die schon van der Hoop 1932 als Darstellung so genannter Kesseltrommeln identifiziert hatte. Diese im Original aus Bronze gefertigten und aufwändig dekorierten Kultgeräte wurden um die Zeitenwende von den Dongson in Nordvietnam gefertigt und als Prestigeobjekte im indonesischen Raum gehandelt; einheimische Metallhandwerker lernten schließlich, sie nachzubauen. Ein Fragment solch einer Kesseltrommel wurde 1936 südlich des Kerinci-Sees entdeckt. Wann es aber dorthin gelangte, ist genauso ungewiss wie das genaue Alter der erwähnten Reliefs.

Eindeutige archäologische Hinweise erbrachten erst unsere Ausgrabungen. So ließen sich Tonscherben aus der Umgebung der Megalithen mit Optischer Lumineszenz-Datierung, einer für Keramiken gut geeigneten physikalischen Technik, auf das 11. bis 13. Jahrhundert eingrenzen. Das deckt sich mit dem Alter einiger Importfunde, die im Hochland überraschen: Rund um die Megalithen kamen Porzellan und Steingut der chinesischen Song-Dynastie (960–1279) sowie indopazifische Glasperlen aus dem 10. bis 14. Jahrhundert ans Licht. Demnach stammen die Monumente in Kerinci also aus der Blütezeit des Malayu-Königreichs. Dies ist das erste gesicherte Datum für einen der Megalithkomplexe auf Sumatra.

Aus jüngerer Zeit, als die islamischen Sultanate bereits die Nachfolge der buddhistischen Reiche angetreten hatten, stammt eine Redewendung, die vielleicht hilft, die Bedeutung der Megalithen in ihrem historischen Kontext zu verstehen: »Serah naik, jaja turun«, das bedeutet wörtlich übersetzt »Das Geschenk geht hinauf, der Tribut kommt herab«. Diese Formulierung beschreibt vermutlich auch die Beziehungen zwischen Hoch- und Tiefland in den Jahrhunderten zuvor: einen regen Güteraustausch. Der Reichtum Srivijayas wie Malayus verdankte sich also dem Seehandel mit Produkten, die aus dem Hochland stammten.

Auf den Spuren des ersten Hochlandkönigtums

Adityawarman (1343–1375), Herrscher von Malayu, ließ seine Hauptstadt von Jambi im Tiefland in das Hochland Sumatras verlegen, in das Gebiet des Volks der Minangkabau. Die Gründe dafür liegen noch im Dunkeln. Vermutlich hoffte er, dort besser vor den Angriffen seiner kriegerischen Nachbarn geschützt zu sein, vielleicht wollte er auch größeren Anteil am Goldreichtum dieser Region haben.

Vom Umzug des Königshofs zeugen Darstellungen des Herrschers als Wächtergottheit an den Reichsgrenzen (siehe Bild) sowie zahlreiche Inschriften auf Steinstelen, die in Sanskrit verfasst sind. Nur ein Teil davon wurde bislang übersetzt. Adityawarman rühmt sich darin, Tempel, Klöster und einen Palast gebaut sowie Bewässerungssysteme angelegt zu haben. Diese und andere Aktivitäten des Königs will ein Projekt archäologisch nachweisen, das 2010 unter der Leitung des Autors begann.

GUNKARTA / CC-BY-SA-3.0

Auf dem Hügel Bukit Gombak am Rand des Hochtals Tanah Datar entdeckten die Forscher etliche Pfostenlöcher – ein Beleg, dass dort Häuser und vielleicht auch ein Palast standen. Scherben chinesischen Porzellans aus der späten Song- und Yuan-Periode (12.–14. Jahrhundert) zeugen von engen Kontakten zu den Überseemärkten Sumatras. Ob es sich um den Herrschaftssitz Adityawarmans handelt, lässt sich noch nicht sagen. Seine Beziehung zu anderen Fundplätzen – auch zu den Megalithen Kerincis – ist ebenfalls noch unklar. Parallel zu weiteren Grabungen wird der Sanskritexperte Arlo Griffiths von der École française d'Extrême-Orient das Inschriftenwerk Adityawarmans erstmals vollständig übersetzen. Ins Blickfeld der Forschung rücken dabei auch die Minangkabau, die wie alle Ethnien des Hochlands keine eigene Geschichtsschreibung besitzen – und von den Chronisten des Tieflands ungeachtet ihrer Bedeutung für den Wohlstand der Königreiche Sumatras weit gehend ignoriert wurden.

ZÁMOLYI FERENC, MIT FRDL. GEN. VON DOMINIK BONATZ

DOMINIK BONATZ

Auch wenn dessen Bewohner der Redewendung zufolge Tribute zu entrichten hatten, waren sie wohl doch in einer strategisch günstigen Position. Die Täler waren schwer erreichbar, und die Ressourcen des Regenwalds zu nutzen, verlangte spezielle Kenntnisse. Ohne das »Geschenk« aus dem Tief-land kam also kein Handel zu Stande. Mochten die Mächtigen in Palembang und später Jambi auch in höfischer Rhetorik von Tribut sprechen – tatsächlich war es ein Tauschhandel. Während das Malayu-Reich seine Ansprechpartner zumindest unter anderem in der Kerinci-Region fand, dürfte Srivijaya zuvor im Hochland von Pasemah eingekauft haben. Denn seine Hauptstadt Palembang liegt geografisch näher an dieser Region, und die dortigen Megalithen erwecken zumindest durch die Art und Weise der Darstellung von Objekten der Dongson-Kultur den Eindruck eines höheren Alters.

Das Auftreten der Kerinci-Megalithen lässt sich letztlich als Folge der intensivierten Beziehungen zu den frühen Königreichen im Tiefland erklären. Mit einem Mal gewannen die Ressourcen des Regenwalds und das Gold in seinen Flüssen an Wert, der Zugriff darauf erhielt eine politische Dimension. Jäger und Sammler, die wie ihre Vorfahren Jahrhunderte zuvor den Regenwald durchstreift hatten, ohne Besitzansprüche anzumelden, gründeten Siedlungen und begannen mit dem Anbau von Feldfrüchten. Denn wer vom Prestige und Reichtum profitieren wollte, den die »Geschenke« aus dem Tiefland verschafften, blieb von nun an in seinem Territorium und schützte es vor dem Eindringen anderer. Niederlassungen entstanden dort, wo Flussläufe und Gebirgstäler den Handel erleichterten. Wahrscheinlich organisierten sich die Siedlungen in Form von Dorfallianzen. Den ideologischen Mittelpunkt einer solchen Zweckgemeinschaft bildete der Megalith, der ihr Territorium markierte und ihren Anspruch auf dauerhafte Präsenz unterstrich.

Allein der Transport eines tonnenschweren Steins und seine Bearbeitung verlangen viele starke Helfer und gute Planung. Bei den letzten aktiven Megalithkulturen Indonesiens, zum Beispiel auf Sumba in Ostindonesien oder auf der Insel Nias vor der Westküste Sumatras, sind es in der Regel einflussreiche Gesellschaftsmitglieder, die ein solches Unternehmen leiten. Mit der Errichtung eines Steins erwerben sie sich besonderes Verdienst; der Stifter lebt durch ihn symbolisch als Ahne im Gedächtnis der Gemeinschaft fort. In ähnlicher Weise dürfte auch die Errichtung der Megalithen in Kerinci und der Region Pasemah die Sozialstruktur der Gemeinschaften beeinflusst haben. Dafür spricht ebenfalls ein Edikt des Sultans von Jambi, der im 18. Jahrhundert die offenbar gängige Praxis der Verehrung von Steinen verbot.

Nicht nur der Aufstieg, auch der Untergang von Malayu am Ende des 14. Jahrhunderts spiegelt sich im archäologischen Befund: Importwaren finden sich immer seltener und fehlen in Siedlungen des 15. Jahrhunderts ganz, denn Kerinci verlor seinen Handelspartner. Wahrscheinlich endete damit der Brauch, Megalithen aufzustellen. Heute ersetzen Mythen alles Wissen über ihre Geschichte. Besonders populär ist in Kerincis Dörfern die Erzählung von hinduistischen Göttern, die einst auf den Vulkanen Sumatras thronten und sich im Streit mit den Steinen bewarfen. Erst die Archäologie erinnert wieder an eine Zeit, in der die Dörfer des Hochlands den Königreichen des Tieflands zu ihrem glanzvollen Aufstieg verhalfen.

DER AUTOR

Dominik Bonatz ist Professor für Vorderasiatische Archäologie an der Freien Universität Berlin. Neben einer Ausgrabung in Syrien leitet er seit 2003 archäologische Untersuchungen auf Sumatra. Mit der Forschung in zwei unterschiedlichen geografischen Regionen verbindet sich das Interesse am Kulturvergleich und am Transfer politischer, religiöser und künstlerischer Konzepte.

QUELLEN

Bonatz, D. et al. (Hg.): From Distant Tales. Archaeology and Ethnohistory in the Highlands of Sumatra. Cambridge Scholars Publishing, Newcastle upon Tyne 2009

Brinkgreve, F., Sulistianingsih, R. (Hg.): Sumatra. Crossroads of Cultures. KITLV Press, Leiden 2009

Miksic, J. (Hg.): Indonesian Heritage: Ancient History. Edition Didier Millet, Singapur 2003

Ptak, R.: Die maritime Seidenstraße. C.H.Beck, München 2007

WEBLINK

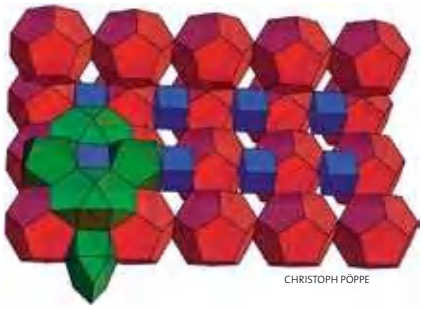
Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1146813**

RAUMFÜLLUNGEN

Wundergarten der Polyeder

Räumliche Körper fügen sich auf überraschende Weise zu neuen Gebilden zusammen.

VON NORBERT TREITZ

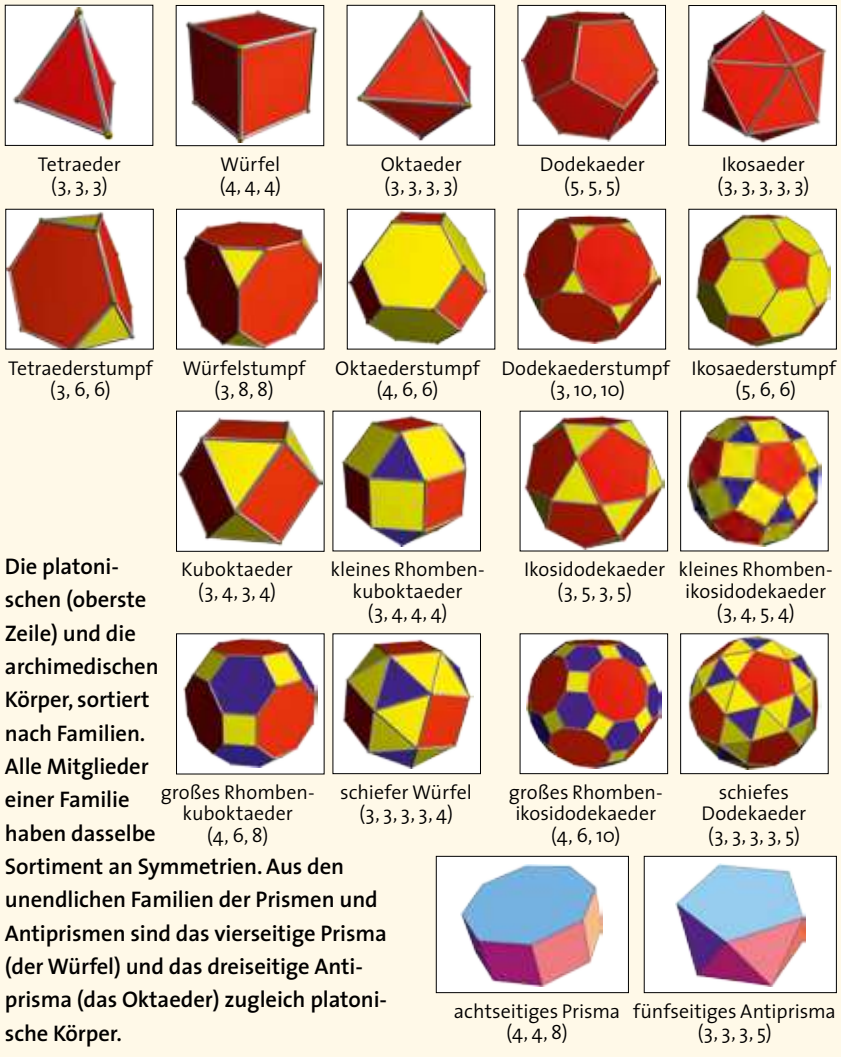


CHRISTOPH PÖPPE

Ein Ausschnitt der Raumfüllung mit Dodekaedern (rot), Würfeln (blau) und Bilunabirotunden (grün). Ein Würfel hat an jeder Ecke Kontakt mit einem Dodekaeder; jedes Dodekaeder hat entlang einer ganzen Kante Kontakt mit acht seinesgleichen (siehe die Darstellung im Märzheft).

Im Märzheft bin ich einem Zusammenhang zwischen geometrischen Körpern nachgegangen, die auf den ersten Blick nichts miteinander zu tun haben. Einerseits lassen sich reguläre Dodekaeder, jene platonischen Körper, die von zwölf regelmäßigen Fünfecken begrenzt sind, Kante an Kante in einem periodischen Gitter anordnen. Dabei stellt sich heraus, dass die Lücken zwischen ihnen präzise durch andere Körper gefüllt werden, die ihrerseits von regelmäßigen Vielecken begrenzt werden; alle vorkommenden Vielecke haben die gleiche Kantenlänge. Bei den Lückenfüllern handelt es sich pro Dodekaeder um einen Würfel sowie drei Exemplare eines hübschen, wenig bekannten Körpers aus zwei Quadraten, acht Dreiecken und vier Fünfecken namens Bilunabirotunda, der Thema des Artikels im März war (Bild oben).

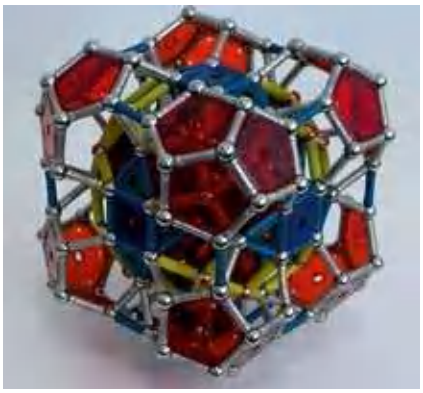
ROBERT WEBB (SOFTWARE3D.COM/STELLA.HTML); PRISMA UND ANTIPRISMA UNTEN: MATHWORLD.WOLFRAM.COM/JOHNSONSOLID.HTML

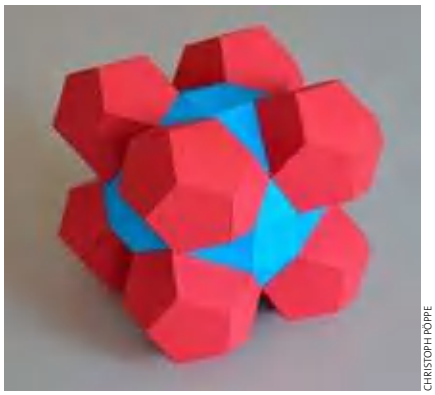


Die platonischen (oberste Zeile) und die archimedischen Körper, sortiert nach Familien. Alle Mitglieder einer Familie haben dasselbe Sortiment an Symmetrien. Aus den unendlichen Familien der Prismen und Antiprismen sind das vierseitige Prisma (der Würfel) und das dreiseitige Antiprisma (das Oktaeder) zugleich platonische Körper.

Andererseits lässt sich die Zusammensetzung aus einem Würfel und sechs Bilunabirotunden auf quasi natürliche Weise zu einem archimedischen (halbregelmäßigen) Körper ergänzen. Da sein Name »kleines Rhombenikosidodekaeder« wenig erhellend ist und obendrein nicht einheitlich verwendet wird, nennen wir ihn lieber (3, 4, 5, 4), was seine »Eckenfigur« kennzeichnet: An jeder Ecke liegen ein Dreieck, ein Viereck, ein Fünfeck und ein Viereck – in dieser Reihenfolge. Das Bild rechts zeigt beide Beziehungen ineinander verschränkt.

Leider lässt sich diese bemerkenswerte Übereinstimmung nicht in eleganter Weise fortsetzen. Man kann zwar aus der Raumfüllung mit Dodekaedern, Würfeln und Bilunabirotunden in periodischer Weise kleine Rhombenikosidodekaeder ausschneiden. Dabei bleibt zwischen zweien von ihnen jeweils ein Würfel als Abstandshalter stehen. Aber die Dodekaeder und die nicht verwen-





CHRISTOPH PÖPPE

DREI FOTOS: NORBERT TREITZ

In der Mitte dieses Gebildes (Stereobildpaar links oben; darunter dessen linkes Bild vergrößert) sitzt ein (unsichtbarer) Würfel mit sechs angrenzenden Bilunabirotunden. Von deren Außenflächen sind ein Quadrat und zwei angrenzende Dreiecke durch blaue Flächen dargestellt. Die gelben Stangen ergänzen diese Flächen zu einem kleinen Rhombenikosidodekaeder (3, 4, 5, 4). Die acht Dodekaeder, die den zentralen Würfel in je einer seiner Ecken berühren, ragen zu etwas mehr als der Hälfte aus dem (3, 4, 5, 4) heraus. Je drei ihrer äußeren Fünfecksflächen sind durch rote Scheiben realisiert. In der Ausführung mit undurchsichtigen Flächen (oben) sind vom (3, 4, 5, 4) nur noch wenige Flächen (teilweise) sichtbar (blau).

deten Bilunabirotunden werden in unansehnliche Teile zerschnitten, was der ganzen Sache etwas von ihrem Reiz nimmt.

Einerlei – es gibt erstaunlich viele Möglichkeiten, mehr oder weniger regelmäßige Körper zu periodischen Füllungen des Raums zusammenzusetzen oder neue Körper zu erzeugen, indem man von einem Körper einen anderen, kleineren wegschneidet. Je symmetrischer die Beteiligten, desto größer ist das Erstaunen, wenn eine solche Anordnung beziehungsweise Zerlegung tatsächlich funktioniert.

Ein bisschen Systematik ist hilfreich, um in der Vielfalt der Polyeder, das heißt von ebenen Flächen begrenzten Körper, den Überblick nicht zu verlieren.

Die höchsten Forderungen an die Regelmäßigkeit und damit Symmetrie erfüllen die fünf platonischen Körper. Sie sind konvex, das heißt, die Verbindungslinie zweier Punkte des Körpers verläuft stets durch das Innere des Körpers; sie sind begrenzt von lauter gleichen, regelmäßigen Vielecken; und alle Eckenfiguren sind gleich, das heißt, um jede Ecke herum liegen dieselben Flächen in derselben Anordnung.

Lässt man Vielecke verschiedener Arten in ein und demselben Körper zu, hält jedoch die anderen Bedingungen aufrecht, so ergeben sich die archimedischen Körper. Deren gibt es 13 Stück plus die unendlich vielen von regulären Vielecken begrenzten Prismen und Antiprismen (Bilder ganz links). Auch diese »halbregelmäßigen« Körper sind durch die Angabe ihrer einzigen Eckenfigur bereits eindeutig bestimmt; zum Beispiel ist (3, 4, 5, 4) das kleine Rhombenikosidodekaeder.

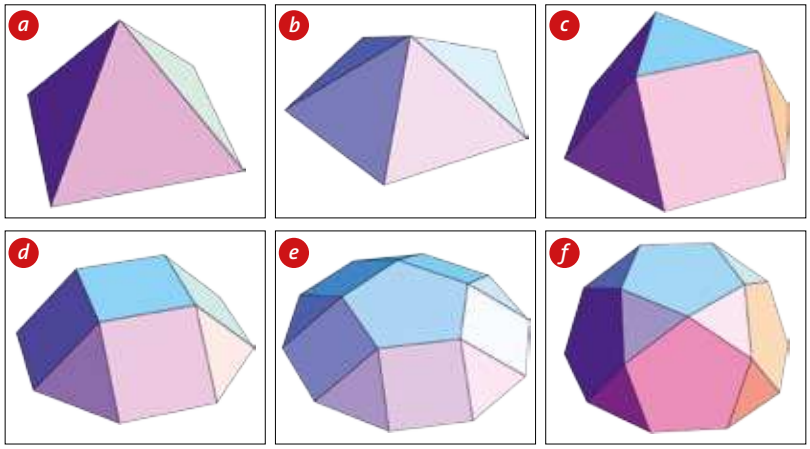
Lässt man darüber hinaus die Forderung nach Gleichheit aller Eckenfiguren fallen, so gewinnt man das unübersichtliche Sortiment der 92 Johnson-Polyeder hinzu, aus dem die Bilunabirotunda die Nummer 91 ist. Von ihnen brauchen wir für unsere Zwecke vor allem die Pyramiden, die Kuppeln und die Rotunde (Kasten S. 68).

Die einfachsten Johnson-Polyeder

Die Liste der 92 Polyeder, die Norman Johnson 1966 aufstellte, beginnt mit der vierseitigen Pyramide nach altägyptischer Art (*a*; die dreiseitige Pyramide ist das platonische Tetraeder und daher nicht in der Liste enthalten). Es folgt die fünfseitige Pyramide (*b*); eine sechs- oder mehrseitige wäre mit der Forderung nach einheitlicher Kantenlänge nicht zu vereinbaren.

Eine *n*-zählige Kuppel hat ein reguläres 2*n*-Eck als Boden und ein *n*-Eck als Dach. Als Seitenwände benötigt man dann *n* Quadrate und *n* gleichseitige Dreiecke. Kuppeln gibt es für *n* = 3 (*c*), 4 (*d*)und 5 (*e*).

Eine Alternative zur fünfzähligen Kuppel ist die noch etwas schönere Rotunde (*f*). Man bekommt sie duch Halbieren des Ikosidodekaeders (3, 5, 3, 5). Bei ihr ist der Abstand zwischen Boden und Decke, also zwischen dem Zehneck und dem dazu parallelen Fünfeck, größer als bei der Kuppel, und zwar genau um die Höhe des fünfzähligen Antiprismas. Die Eckenfigur aus zwei regulären Fünfecken und den zwei Dreicken dazwischen tritt im (3, 5, 3, 5) ebenso auf wie in der Rotunde und in der Bilunabirotunda und hat zum Namen der Letzteren beigetragen.



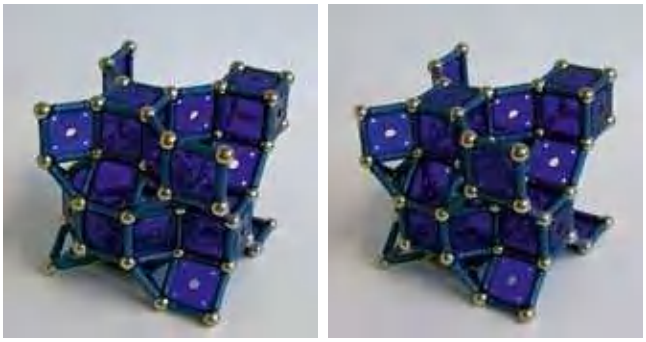
MATHWORLD.WOLFRAM.COM/JOHNSONSOLID.HTML

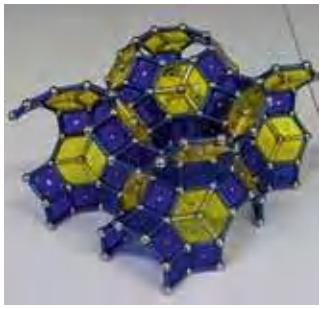
Gibt man schließlich auch noch die Forderung nach Konvexität auf, so öffnet man einer unübersehbaren Vielfalt Tür und Tor. Bonnie Stewart, Mathematikprofessor an der Michigan State University, hat in jahrelanger Kleinarbeit die schönsten unter ihnen aufgelistet, weswegen symmetrische Polyeder mit Hohlräumen heute allgemein Stewart-Toroide heißen.

Früher gab es Milch- und Safttüten in Tetraederform, die lückenlos einen Behälter in Form eines sechsseitigen Prismas füllten. Aber das funktionierte nur, weil die Tütenkanten nicht genau gleich lang waren. Das reguläre Tetraeder allein, das heißt nur zusammen mit seinesgleichen, ist kein Raumfüller, wohl aber in Kombination mit dem regulären Oktaeder (3, 3, 3, 3) oder dem Tetraederstumpf (3, 6, 6) oder auch dem Würfelstumpf (3, 8, 8). Interessante Raumfüllungen ergeben sich auch durch Kombination von mehr als zwei verschiedenen Körpern (Bilder unten).

Schwammpolyeder: Ein Universum für zwei verfeindete Insektenstämme

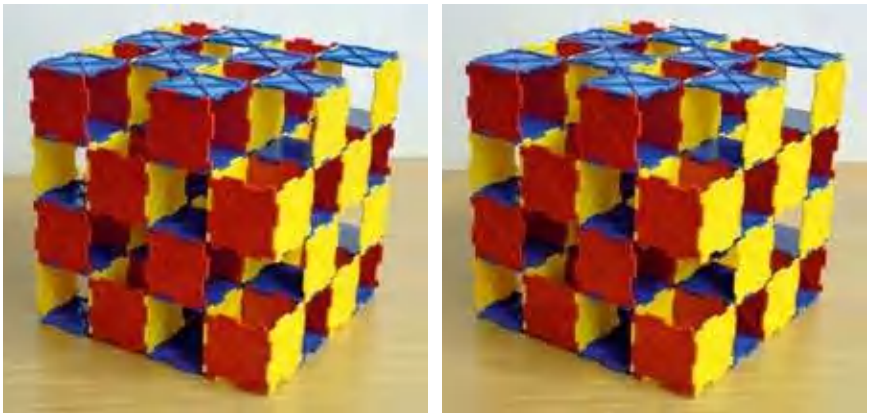
Das große Rhombenkuboktaeder (4, 6, 8) ist zu kugelähnlich, um den Raum zu füllen. Einerlei wie man zwei von ihnen aneinandersetzt, der Spalt zwischen ihnen ist zu eng, um noch ei-





Links eine raumfüllende Elementarzelle aus vier kleinen Rhombenkuboktaedern (3, 4, 4, 4), vier Würfeln (4, 4, 4) und acht Tetraedern (3, 3, 3). Eine Raumfüllung aus großen Rhombenkuboktaedern und achtseitigen Prismen führt auf eine Zerlegung des Raums in zwei deckungsgleiche, einander vielfach umschlingende Teilräume. Im Geomag-Modell (links unten) ist jedes Sechseck aus drei Rauten zusammengesetzt; in der Kartonversion (unten) kann ein Ameisenvolk mit gelben, das andere mit grünen Wänden leben.

FOTOS DIESER DOPPELSEITE: NORBERT TREITZ



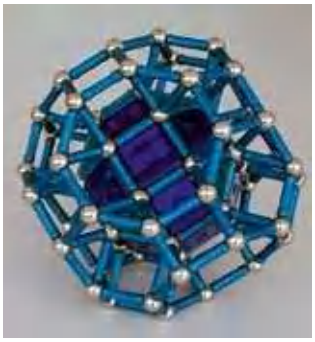
In diesem Jovo-Modell des einfachsten Schwammpolyeders aus Würfeln hat der eine Teilraum ausschließlich glatte Wandseiten, der andere genau deren gerippte Rückseiten.

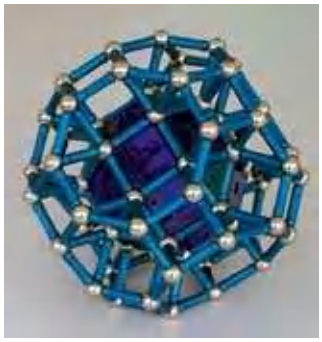
nem weiteren Exemplar Platz zu bieten. Aber wenn man auf die Achtecke lauter achtseitige Prismen (4, 4, 8) als Abstandshalter aufsetzt, ergibt sich eine perfekte Raumfüllung.

Wer diese mit einem Baukasten (zum Beispiel Jovo) aus flächigen Bauteilen herstellen will, kommt fast von selbst auf die Idee, die Achtecke wegzulassen, vor allem wenn der Baukasten die gar nicht hat. Und siehe da – alle übrigen Wände zusammen teilen den Raum in zwei deckungsgleiche, gegeneinander versetzte Hälften. Man kann sich in jeder von ihnen ungehindert bewegen, kommt aber nie von der einen Hälfte in die andere. Man könnte also zwei Insektenstämme voneinander isoliert in den Hälften unterbringen oder die beiden Seiten aller Wände in verschiedenen Farben anmalen, so dass in jeder Hälfte nur eine Farbe zu sehen ist (Bilder links unten). Die beiden Teilräume umschlingen sich gegenseitig, ohne Inseln zu bilden, vergleichbar mit den Teilräumen, die in einem Schwamm von Gummi und Luft eingenommen werden.

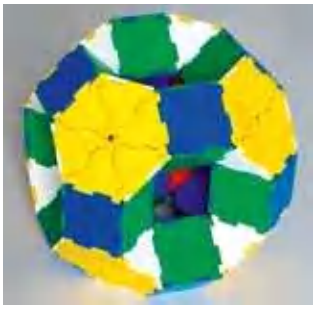
Man verwandle durch gezieltes Entfernen von Wänden eine Raumfüllung in ein Schwammpolyeder: Das funktioniert auch mit der einfachsten unter ihnen. Zerschneidet man eine Würfelpackung entlang einer ihrer Ebenen, so gleicht die Schnittfläche einem unendlich großen Schachbrett. Man setze einen Presslufthammer auf jedes schwarze Feld an und breche nicht nur dieses heraus, sondern alle Wände, die dem – unendlich langen – Hammer auf seinem Weg begegnen. Das tue man für alle drei Koordinatenrichtungen. Dadurch entstehen in der ehemaligen Würfelpackung lauter unendlich lange Gänge, während quer zu deren Laufrichtung die Wände so dicht stehen wie nur möglich. Wieder ergeben sich zwei Teilräume für die friedliche Koexistenz verfeindeter Ameisenvölker (Bild links).

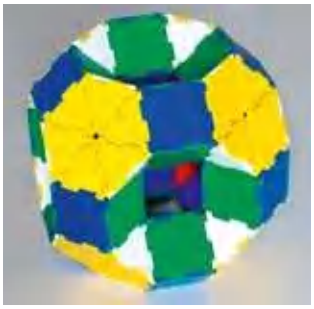
Zum selben Ergebnis kommt man auch auf völlig anderem Weg. Man betrachte die Summe der an einer Ecke anliegenden Winkel. Sind es weniger als 360 Grad, so kann man die dort angrenzenden Vielecke – denken wir sie uns aus Papier – in den Raum hochfalten, woraus sich – manchmal – ein platonischer Körper ergibt. Sind es mehr, was zum Beispiel bei sechs Quadraten der Fall ist, dann muss man die Vielecke teils nach oben, teils nach unten falten, damit sie überhaupt zusammenpassen. Die Forderung, dass obendrein alle Eckenfiguren gleich sein sollen, führte 1926 den Mathematiker Donald Coxeter (1907–2003) und den Ägyptologen



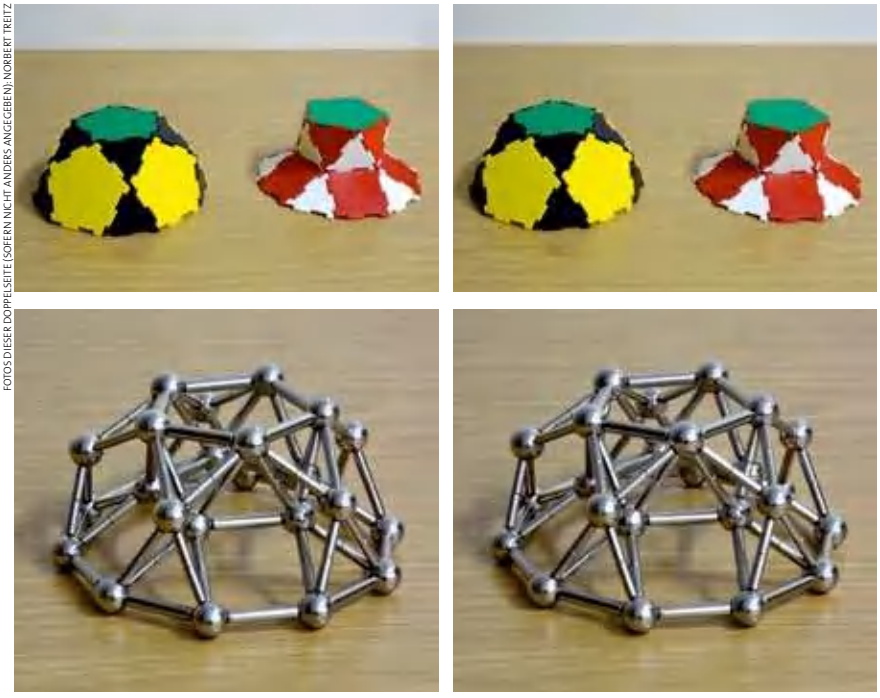


Umgibt man das kleine Rhombenkuboktaeder (3, 4, 4, 4) mit Würfeln sowie Dreier- und Viererkuppeln (rechts), so ergibt sich das große Rhombenkuboktaeder (4, 6, 8). Das Jovo-Modell (unten links) zeigt aus Mangel an Achtecken das Toroid aus den Würfeln und den dreizähligen Kuppeln: An die Stelle der Viererkuppel treten sechs Löcher, die den Weg von außen zum hohlen (3, 4, 4, 4) eröffnen. Im Modell aus Fensterfolie (unten rechts) hat man viel größere Freiheiten, ein Bauteil wegzulassen oder auch nicht.





FOTOS DIESER DOPPELSEITE (SOFERN NICHT ANDERS ANGEGEBEN): NORBERT TREITZ



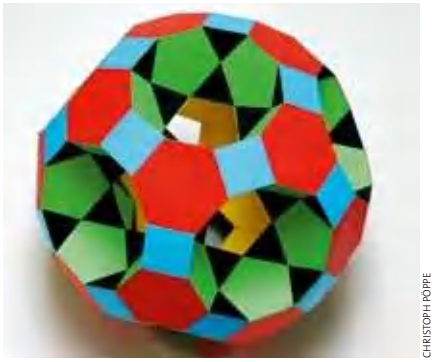
Eine Rotunde und ein Hut (fünfzählige Kuppel mit aufgesetztem fünfseitigem Antiprisma) haben genau die gleiche Höhe und können als Außen- und Innenwand eines Stewart-Toroids (unten) dienen. Wegen der kleinen Winkel an Boden und Deckel erfordert die Konstruktion besonders dünne Magnetstäbe.

Flinders Petrie (1853–1942) zur Entdeckung der unendlich ausgedehnten Polyeder, die sie »skew polyhedra« nannten (Spektrum der Wissenschaft 1/2011, S. 66; siehe auch die bewegten Bilder in dem Artikel »Regular skew polyhedra« der englischen Wikipedia).

Vom kleinen zum großen archimedischen Rhombenkörper

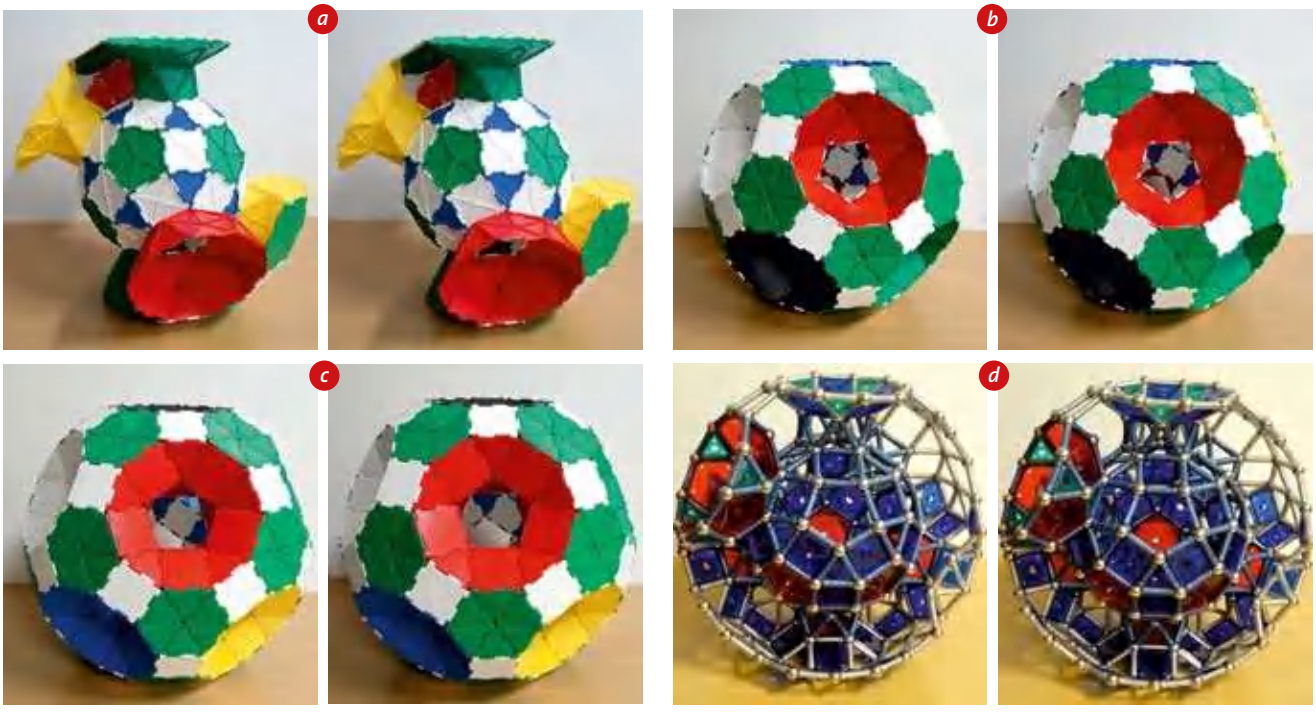
Die archimedischen Körper, deren Namen mit »Rhomb« beginnen, kommen in beiden großen Familien vor, das heißt, manche haben die Symmetrie des Würfels und des Oktaeders, andere diejenige des Dodekaeders und des Ikosaeders (Bilder S. 66). Mehr noch: Es gibt sie in beiden Familien in einer kleinen und einer großen Version.

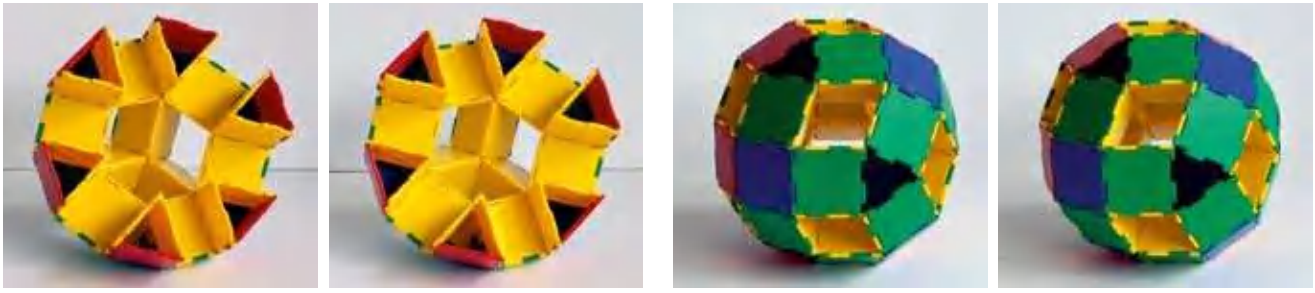
In der Tat ist bei gleicher Kantenlänge das große Rhombenkuboktaeder



CHRISTOPH PÖPPE

Dieses Stewart-Toroid (a: im halb fertigen Zustand, b: mit Blick auf eine Rotunde, c: mit Blick auf einen Hut und d: mit Kugeln und Magnetstäbchen), das zwischen dem (3, 4, 5, 4) und dem (4, 6, 10) vermittelt, hat sechs Rotunden und sechs Hüte. Das Papiermodell (rechts) zeigt die hochsymmetrische Variante mit zwölf Rotunden.





Dieses »schräge« Toroid entsteht aus dem Rhombendodekaeder durch Aufsetzen von Tetraedern, vierseitigen Pyramiden und dreiseitigen Prismen. In diesem Modell (links im halb fertigen Zustand) ist das Rhombendodekaeder selbst »leer«; ausgeführt sind nur die sichtbaren Wände der aufgesetzten Körper.

(4, 6, 8) größer als das kleine (3, 4, 4, 4). Beide haben die volle Symmetrie von Würfel und Oktaeder. Aus dem kleinen gewinnt man das große, indem man ihm Körper aus unserem Sortiment aufsetzt. Auf jedes seiner acht Dreiecke kommt eine dreizählige Kuppel, auf jene sechs Quadrate, die nur mit Quadraten Kanten gemeinsam haben, setzt man vierzählige Kuppeln und auf die restlichen zwölf Quadrate jeweils einen Würfel (Bilder S. 69 unten).

Aus dem kleinen Rhombenikosidodekaeder (3, 4, 5, 4) kann man nach demselben Muster ein großes machen, indem man jedem seiner Fünfecke eine Rotunde aufsetzt. Damit sitzen die Zehnecke des großen Rhombenikosidodekaeders (4, 6, 10) bereits an der richtigen Stelle. Die restlichen Flächen kann man allerdings nicht auf elegante Weise mit Johnson-Polyedern besetzen.

Auch die fünfzählige Kuppel vermittelt zwischen Fünf- und Zehneck, diesmal mit je fünf Drei- und Vierecken. Aber Kuppeln werden mit zunehmender Seitenzahl immer flacher, und die Fünferkuppel kommt ihrer sechsseitigen Kollegin, die im Wortsinn flachfällt, schon gefährlich nahe. Erst wenn man ihr ein fünfseitiges Antiprisma aufsetzt, ergibt sich eine Art Hut, der an einen Lautsprecher erinnert; und der ist wundersamerweise genauso hoch wie die Rotunde. Man kann die beiden Körper ineinanderstecken und bekommt ein Stewart-Toroid in Form eines doppelwandigen Lampenschirms (Bilder S. 70 oben).

Wenn man also die beiden Rhombenikosidodekaeder in passender Orientierung zentriert, passen zwischen je ein Fünfeck des inneren und ein Zehneck des äußeren wahlweise eine Rotunda oder ein Hut. Lässt man alle Zehnecke und Fünfecke weg und setzt entweder zwölf Rotunden oder aber zwölf Hüte ein, so erhält man ein Stewart-Toroid mit voller Symmetrie. Zahlreiche Varianten ergeben sich, indem man Rotunden und Hüte gemischt verwendet (Bilder S. 70 unten).

Quadrate mit schiefen Fenstern

Wenn man aus Jovo-Bauteilen (bei denen als Vierecke nur Quadrate vorkommen) von einem Würfel lediglich die vier Seitenwände baut und Boden und Decke weglässt, sind die beiden fehlenden Flächen nur als Rauten festgelegt und noch nicht als Quadrate. Auf diese Weise bin ich zufällig auf ein toroidales Polyeder gestoßen, das als »echte« Wände nur gleichseitige Dreiecke und Quadrate hat, aber als frei bleibende Flächen auch Rauten und als Hohlräume gerade Prismen über Rauten enthält. Alle Rauten haben die Wurzel aus 2 als Verhältnis der Diagonalenlängen.

Der Kern des Körpers ist ein Rhombendodekaeder, das von zwölf solchen Rauten gebildet wird. Es hat 14 Ecken; in sechs von ihnen (den »spitzen« Ecken) treffen sich vier Rauten mit den spitzwinkligen Ecken. Die restlichen acht Ecken sind »stumpf«; dort stoßen je drei Rauten mit ihren stumpfwinkligen Ecken zusammen. Das Rhombendodekaeder hat eine Vielzahl interessanter Eigenschaften. So ist es ein Raumfüller (SdW 11/2007, S. 36), und eine Raumfüllung mit diesen Körpern wird durch gezieltes Wegnehmen von Wänden ebenfalls zu einem Ameisenhügel, in dem zwei Insektenstämme friedlich und berührungslos koexistieren können.

Jetzt kommt wieder etwas (gedankliche oder echte) Bastelarbeit: Wir stellen aus Jovo-Teilen zwölf decken- und bodenlose Würfel her und setzen sie mit einer ihrer Öffnungen auf die rautenförmigen Flächen eines Rhombendodekaeders. Die jeweils andere Öffnung liegt an der Außenseite des so entstandenen Gebildes und ist ebenso rautenförmig. Die Lücken, welche die verzerrten Würfel auf der Außenseite zwischen sich lassen, lassen sich wundersamerweise genau mit regelmäßigen Vielecken zudecken: ein Quadrat (grün im Bild oben) über jeder der 24 Kanten des Rhombendodekaeders, ein Quadrat (blau) über jeder spitzen Ecke und ein Dreieck (schwarz) über jeder stumpfen. So ergibt sich ein Toroid mit rautenförmigen Löchern. ~

DER AUTOR

Norbert Treitz ist pensionierter Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen.

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1146812

SERIE ENERGIE | TEIL 6

Hoffnungs(energie)träger **Wasserstoff**

SERIE IM ÜBERBLICK

DIE ZUKUNFT DER ENERGIE

Teil 1	Strom aus der Sonne	Dezember 2011
Teil 2	Windräder	Januar 2012
Teil 3	Wasserkraft	Februar 2012
Teil 4	Biotreibstoffe	März 2012
Teil 5	Energiespeicher	April 2012
Teil 6	**Wasserstofftechnologie**	**Mai 2012**

Aus Wasser oder Gas hergestellt, gespeichert, transportiert und schließlich in Brennstoffzellen zur Stromgewinnung verbrannt – Wasserstoff birgt das Potenzial, drängende Probleme der Energieversorgung zu lösen. Doch nur, wenn es gelingt, bei all diesen Schritten die Kosten deutlich zu senken.

Von Vincent Artero, Nicolas Guillet, Daniel Fruchart und Marc Fontecave

Der Energiehunger der Welt wächst. Eine auf Wasserstoff basierende Wirtschaft böte Chancen, ihn nachhaltig zu stillen, ohne die Klimaerwärmung weiter voranzutreiben.

SHUTTERSTOCK / ELNUR AMIKISHIYEV

Nun, was wird an Stelle der Kohle zum Brennen dienen?

Das Wasser, antwortete Cyrus Smith.

Das Wasser!, rief Pencroft erstaunt. Um Dampfschiffe und Lokomotiven zu treiben? Wasser, um damit zum Beispiel Wasser zu erhitzen?

Jawohl, doch das in seine Elementarbestandteile zerlegte Wasser, belehrte ihn Cyrus Smith. Zerlegt durch Elektrizität. Ich bin davon überzeugt, meine Freunde, dass das Wasser dereinst als Brennstoff Verwendung findet, dass Wasserstoff und Sauerstoff, die Bestandteile desselben, zur unerschöpflichen Quelle der Wärme und des Lichtes werden.

Jules Verne, »Die geheimnisvolle Insel«, 1875

Was Leser im Jahr 1875 noch fantastisch anmuten musste, klingt heute nach einer realisierbaren Vision. Kaum ein Automobilhersteller, der inzwischen nicht Elektrofahrzeuge entwickelt, die entweder Batterien oder Brennstoffzellen mit Strom versorgen. Jules Vernes Protagonist Cyrus Smith schätzte zwar, dass die Ära der Kohle noch mindestens 300 Jahre währen sollte, doch wusste der Autor nichts von den Folgen des Verbrennens fossiler Energieträger für das Erdklima. Wohl aber kannte man längst das Prinzip, gasförmigen Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2) durch Elektrolyse zu gewinnen, sowie auch den umgekehrten Prozess: Der britische Jurist und Physiker Sir William Robert Grove baute 1839 die erste »galvanische Gasbatterie«. Doch erst die Ingenieure der NASA machten sich im Rahmen der Missionen Gemini und Apollo daran, eine praxistaugliche Brennstoffzelle zu entwickeln.

Heute erscheint sie als Hoffnungsträger. Nicht nur ist Wasser reichlich vorhanden, während die Vorräte an Erdöl und auch an Uran begrenzt sind. Vor allem sollte eine Wasserstoffwirtschaft helfen, die Klimaerwärmung zu reduzieren, denn wenn ein H_2-Molekül durch die Reaktion mit Sauerstoff in der Brennstoffzelle aufgebrochen wird, entstehen als Nebenprodukte lediglich Wärme und Wasser. Ausgangs- und Endprodukt sind also identisch, es ergibt sich ein geschlossener Kreislauf.

Das macht diese Technologie zum idealen Baustein einer nachhaltigen Energieversorgung. Wohlgemerkt: Es geht hier nicht um die heute meist zur Wasserstoffbereitstellung für die chemische Industrie eingesetzten Verfahren, etwa die Dampfreformierung von Erdgas. Diese basieren fast ausschließlich auf der Umwandlung von Kohlenwasserstoffen, und am Ende des Prozesses entsteht neben H_2 auch Kohlendioxid (CO_2) – jenes Treibhausgas, das wir künftig gern vermeiden würden. Bislang erfolgen nur gut 2,5 Prozent (Stand 2010) der weltweiten Wasserstoffproduktion über die im Vergleich teurere Elektrolyse, zumeist in unmittelbarer Nachbarschaft großer Wasserkraftwerke, um Stromüberschüsse zu nutzen.

Und genau das macht das Gas für die dezentrale Energieversorgung auf Grundlage regenerativer Energien so reizvoll: Da Sonne und Wind nicht überall auf der Welt ausreichend zur Verfügung stehen, das Angebot überdies mit den Tages- und Jahreszeiten sowie den Wetterbedingungen variiert, sucht diese Branche nach Möglichkeiten, produzierte Elektrizität »zwischenzulagern«. Stromüberschüsse lassen sich zur Elektrolyse nutzen und so in Form von Wasserstoff speichern. Auf der Insel Utsira, 18 Kilometer von der norwegischen Küste entfernt, geschieht das schon heute. Dort liefern Windräder Strom für ein Dutzend Häuser. Gibt es einen Überschuss, zersetzt ein Elektrolyseur Wasser. Lässt der Wind später nach, läuft eine Brennstoffzelle an. Ähnliche Projekte laufen auf den Inseln Korsika und La Réunion. Sie sollen klären, ob es möglich ist, abgelegene Wohnorte allein durch Fotovoltaik mit Strom zu versorgen.

Doch noch sind das Pilotstudien. Eine breite Markteinführung der Technologie steht weiterhin aus, allen Visionen zum Trotz. Leistungsfähige Brennstoffzellen sind nach wie vor eine kostspielige Angelegenheit. Es hapert auch bei den vorgelagerten Schritten: Wasserstoff muss kostengünstig hergestellt und gespeichert, danach sicher und günstig bereitgestellt werden. Immerhin zeichnen sich inzwischen für jeden dieser Schritte Lösungen ab.

Aus Wasser lässt sich Wasserstoff durch Elektrolyse herstellen (die Erzeugung von Wasserstoff aus Biomasse ist noch Grundlagenforschung, siehe Kasten S. 78/79): Fließt elektrischer Strom durch eine schwach alkalische oder saure Lösung, blubbert alsbald Wasser- beziehungsweise Sauerstoff an den Polen empor. Schon hier zeigen sich erste Schwierigkeiten: Die elektrochemischen Vorgänge an den Elektroden ebenso wie die aufsteigenden Gasbläschen können den elektrischen Widerstand erhöhen, damit aber sinkt der Wirkungsgrad. Die dank der verwendeten Materialien günstigste und am weitesten entwickelte Variante ist wohl die alkalische Elektrolyse, bei der zwei Elektroden aus Stahl oder Nickel in eine basische Flüssigkeit eintauchen. Leider beanspruchen industrielle Anlagen dieser Art nicht nur viel Platz – starke Stromschwankungen, wie sie bei Fotovoltaik- oder Wind-

AUF EINEN BLICK

ALLHEILMITTEL WASSER

1 Die in Wasserstoffmolekülen (H_2) gespeicherte chemische Energie lässt sich mit **Brennstoffzellen** in elektrische umwandeln. Dabei entsteht nur Wasser als »Abfallprodukt«, nicht das Treibhausgas CO_2.

2 Die ökologisch sinnvollste Art und Weise, H_2 zu produzieren, ist die **Elektrolyse von Wasser**. Denn dazu könnte Strom aus regenerativen Energiequellen genutzt und so Überschussproduktion zwischengespeichert werden.

3 Sowohl die Elektrolyse als auch die Wasserstoffspeicherung müssen noch weiterentwickelt werden, um mit den etablierten Verfahren der Energieversorgung wie dem System Erdölindustrie/**Verbrennungsmotor** konkurrieren zu können.

4 Lösungsansätze imitieren **biologische Vorbilder** bei der Wasserstoffproduktion und nutzen **Metallhydride für die Speicherung**.

kraftanlagen auftreten, können auch allerlei Schäden anrichten. Entsteht beispielsweise zu viel Wasserstoff auf einmal, perlt er aus und verdrängt den Elektrolyten. Störungen der Pumpen und Probleme, die Reaktionsprodukte zu trennen, sind die Folge. Wächst die Stromzufuhr innerhalb kürzester Zeit von einem niedrigen auf einen hohen Wert, kann dieser Effekt sogar die Elektroden angreifen. Denn der Strom fließt nur durch jene Flächen, die mit dem Elektrolyten in Kontakt stehen. Diese heizen sich auf, und das Material nimmt Schaden. Eine Alternative ist die Elektrolyse bei Temperaturen von 750 bis 800 Grad Celsius, die hohe Wirkungsgrade erreicht. Die nötige Wärme aber mindert die Ausbeute wieder, es sei denn, man nutzt zum Beispiel die Abwärme aus den Kühltürmen eines AKW, um die Elektrolysereaktion in Gang zu setzen. Hier zu Lande wäre das aber wegen des Atomausstiegs kein dauerhaft gangbarer Weg mehr.

Eine Membran als Elektrolytersatz

Praktikabler erscheint der Einsatz einer »Protonaustauschmembran« (englisch: proton exchange membrane, Abkürzung PEM), die aus einem Polymer besteht und mit 100 bis 200 Mikrometer so dünn wie ein Haar ist. Für Gase und Elektronen undurchlässig, vermag sie Protonen von der Anode zur Kathode zu leiten und ersetzt somit den Elektrolyten. PEM-Systeme laufen bei Temperaturen zwischen 21 und 80 Grad Celsius bei elektrischen Strömen von bis zu vier Ampere pro Quadratzentimeter. Sie verarbeiten destilliertes Wasser und beanspruchen wenig Platz, doch vor allem verkraften sie plötzliche Stromschwankungen.

Diese drei Betriebstypen der Elektrolyse – alkalisch, bei hohen Temperaturen und mit Protonaustauschmembran – gelten auch für Brennstoffzellen, die den Prozess wieder umkehren, also chemische in elektrische Energie umwandeln. Alkalische Brennstoffzellen sind zwar günstig, vertragen aber kein Kohlendioxid, da es mit dem Kaliumhydroxid des Elektrolyten reagiert. Sie können also nicht mit Luft versorgt werden, sondern benötigen teuren reinen Sauerstoff.

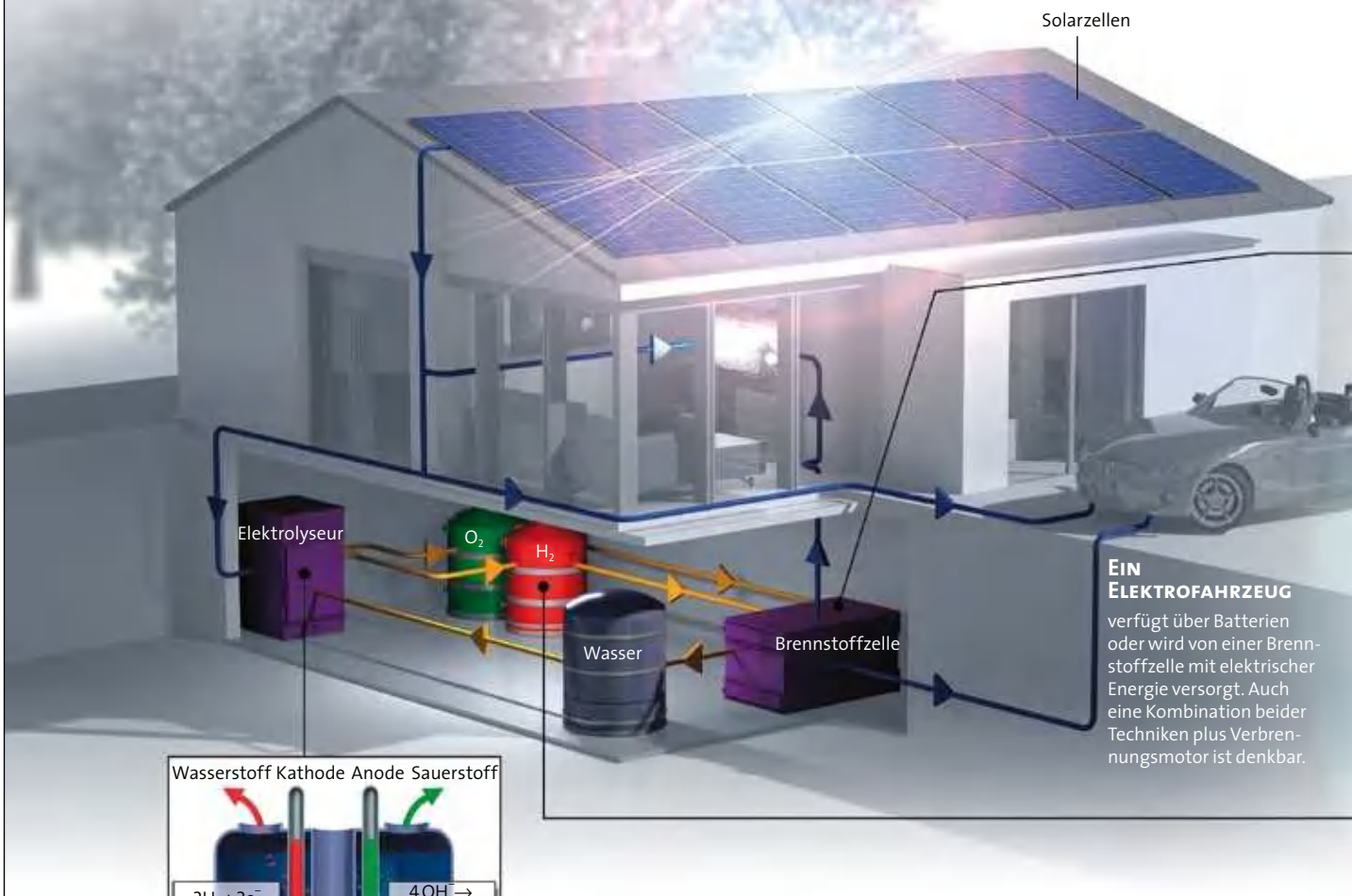
PEM-Brennstoffzellen bieten prinzipiell eine breite Leistungspalette zwischen 0,1 Watt und 100 Kilowatt, theoretisch erreichen sie Wirkungsgrade von 50 bis 70 Prozent. Nicht nur für die Selbstversorgung abgelegener Häuser sind sie interessant, auch die meisten Automobilhersteller haben sich dafür entschieden, wenn sie über ein Elektrofahrzeug mit Brennstoffzellen nachdenken. PEM-Systeme eignen sich im Übrigen ebenfalls dafür, Kohlenwasserstoffe statt reinen Wasserstoff zu verstromen. Das wird etwa im Rahmen des Projekts Callux für einen Praxistest von Brennstoffzellen-Heizgeräten genutzt, der 2015 abgeschlossen sein soll. Als Brennstoff dienen dort Erdgas und aus Biomasse gewonnenes Gas. Schließlich kommen modifizierte PEM-Geräte auch bei Direkt-Methanol-Brennstoffzellen (DMFC) zum Einsatz. Solche Systeme sind vor allem für die Stromversorgung von Elektromobilen gedacht, da sich Methanol einfacher tanken lässt. Der Nachteil dieser Alternative zur Wasserstoffwirtschaft: Bei der elektrochemischen Reaktion entsteht CO_2.

Auch für die Wasserstofferzeugung per Elektrolyse gilt die Protonaustauschmembran als wichtigster Hoffnungsträger. Es ist sogar möglich, beide Funktionen in einem Gerät zu vereinen: Die »reversible Brennstoffzelle«, ergänzt um einen Wasserstoffspeicher, produziert bei Stromüberschuss Gas und bei Strombedarf Elektrizität. Sie ist vergleichsweise Platz sparend und kommt mit wenig Wartung aus, würde sich also für Privathaushalte eignen. Nur die beträchtlichen Kosten der eingesetzten Materialien, vor allem für Membran und Katalysator, stehen dem entgegen.

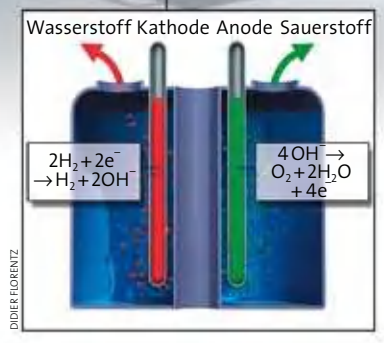
Denn bei PEM-Systemen dürfen die Elektroden nicht aus herkömmlichen Metallen wie Eisen, Kobalt oder Nickel bestehen. Sie würden oxidieren und sich schnell auflösen. Zudem erfordert die niedrige Betriebstemperatur einen Katalysator, der die Energieschwelle der Reaktion herabsetzt. In Frage kommen Edelmetalle wie Platin, Palladium und Iridium,

Auf dem Weg zu einer Wasserstoff-Infrastruktur

Das Haus von morgen könnte durch Solarmodule mit Strom versorgt werden. Energieüberschuss speist dann einen Elektrolyseur, der aus Wasser Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2) gewinnt. Ersterer kann in einem Metallhydrid kompakt gespeichert werden, der Sauerstoff strömt in einen Tank. Eine Brennstoffzelle erzeugt daraus später wieder Elektrizität.



Ein Elektrofahrzeug verfügt über Batterien oder wird von einer Brennstoffzelle mit elektrischer Energie versorgt. Auch eine Kombination beider Techniken plus Verbrennungsmotor ist denkbar.



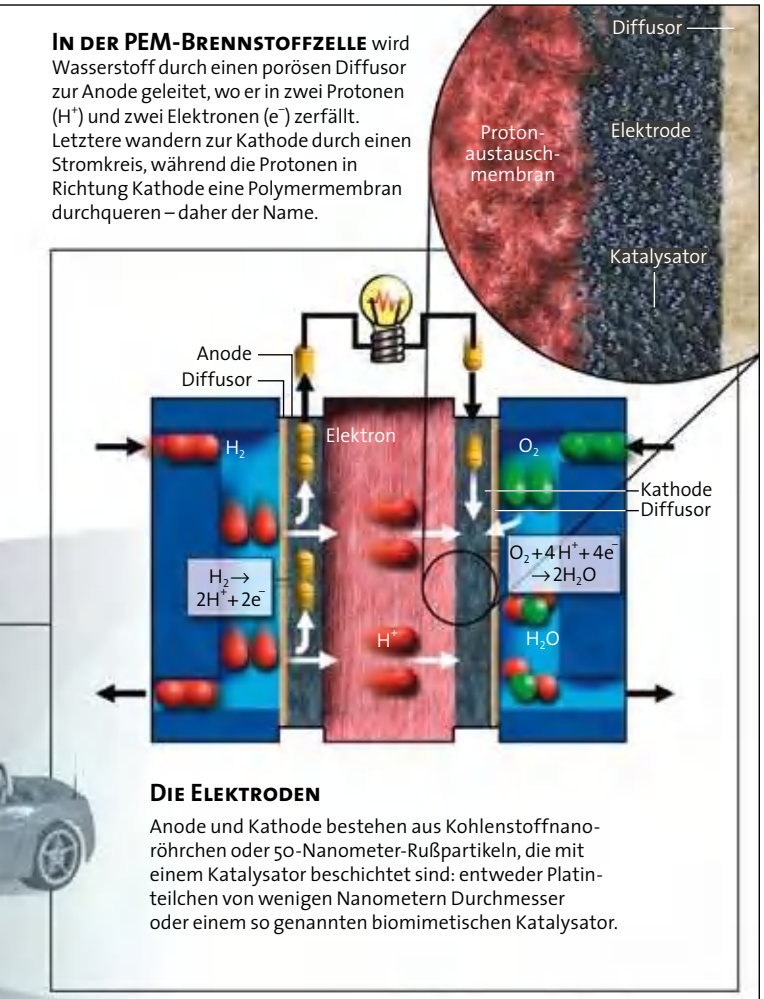
DIDIER FLORENTZ

Der Elektrolyseur erzeugt gasförmigen Wasserstoff und Sauerstoff aus Wasser und Elektrizität. In einem alkalischen Elektrolyseur (links) wird eine Spannung von 1,5 bis 2 Volt an Elektroden aus Nickel beziehungsweise Stahl mit Nickelüberzug angelegt. In eine hochkonzentrierte Kaliumhydroxidlösung getaucht, erzeugt die eine Wasserstoff (rot) und die andere Sauerstoff (grün). Es ist auch möglich, Elektrolyseur und Brennstoffzelle in einem Gerät zu vereinen und je nach Bedarf Wasserstoff oder Strom zu erzeugen.

doch die sind teuer: Ein Kilogramm Platin kostet auf dem Weltmarkt mitunter 40 000 Euro!

Derzeit enthält eine Brennstoffzelle, die den Elektromotor eines mittelgroßen Pkw mit Strom beliefern könnte, 20 bis 30 Gramm des Edelmetalls, was bei einer Serienfertigung mehr als 20 Prozent der Produktionskosten ausmachte. Die Vorkommen würden aber ohnehin nicht ausreichen, um alle Fahrzeuge der Welt auszurüsten. Experten schätzen die noch abzubauenden Platinressourcen auf 30 000 Tonnen. 200 Tonnen werden jährlich gewonnen, was gerade einmal für die Brennstoffzellen von zehn Millionen Fahrzeugen reichen würde. Doch auf der Welt dürften mehr als 700 Millionen Pkws im Umlauf sein! Obendrein konkurriert die Wasserstofftechnik mit anderen Verwendungen von Platin, etwa in Abgaskatalysatoren. Und am Ende der Nutzungsdauer lässt sich nur etwa die Hälfte davon aus einer Brennstoffzelle wiedergewinnen.

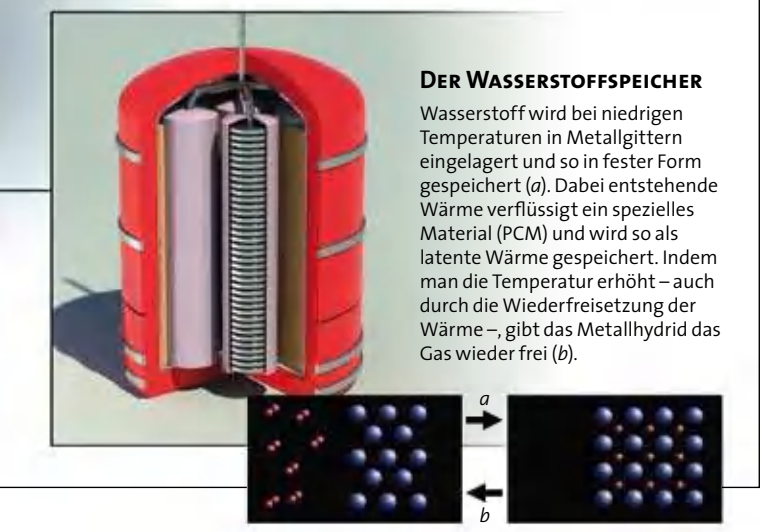
Daher gilt es, die benötigte Menge Platin auf zwei bis drei Gramm pro Fahrzeug-PEM-Zelle zu reduzieren, das entspräche 0,1 Gramm pro Kilowatt erzeugter elektrischer Energie. Eine Möglichkeit dafür bietet die Nanotechnologie. Kommt das Edelmetall in Form winziger Partikel in die Elektroden, vergrößert sich die katalytisch wirksame Gesamtoberfläche. Weniger ist dann wirklich mehr! Ein zweiter Ansatz kombiniert Platin mit anderen, preiswerten Katalysatoren, insbesondere Übergangsmetallen wie Nickel, Kobalt, Mangan oder Eisen. Nanopartikel aus solchen Legierungen sind sogar leistungsfähiger als Platin allein. Schließlich würden auch höhere Betriebstemperaturen – 150 statt derzeit 80 Grad Celsius – die benötigte Menge an Edelmetallen senken und gleichzeitig deren Blockierung durch Verunreinigungen und Gase wie Kohlenmonoxid oder Stickoxide verhindern, die über die Reaktionsgase in die Zelle gelangen. Dafür müssten aber neue Protonaustauschmembranen entwickelt werden, die in einem breiteren Temperaturbereich arbeiten.



In der PEM-Brennstoffzelle wird Wasserstoff durch einen porösen Diffusor zur Anode geleitet, wo er in zwei Protonen (H^+) und zwei Elektronen (e^-) zerfällt. Letztere wandern zur Kathode durch einen Stromkreis, während die Protonen in Richtung Kathode eine Polymermembran durchqueren – daher der Name.

Die Elektroden

Anode und Kathode bestehen aus Kohlenstoffnanoröhrchen oder 50-Nanometer-Rußpartikeln, die mit einem Katalysator beschichtet sind: entweder Platinteilchen von wenigen Nanometern Durchmesser oder einem so genannten biomimetischen Katalysator.



Der Wasserstoffspeicher

Wasserstoff wird bei niedrigen Temperaturen in Metallgittern eingelagert und so in fester Form gespeichert (*a*). Dabei entstehende Wärme verflüssigt ein spezielles Material (PCM) und wird so als latente Wärme gespeichert. Indem man die Temperatur erhöht – auch durch die Wiederfreisetzung der Wärme –, gibt das Metallhydrid das Gas wieder frei (*b*).

Die Natur als Vorbild

In den letzten fünf Jahren gelang es zudem, durch die Modellierung von Wasserstoff produzierenden Mikroorganismen zumindest im Labor mit nur 0,25 Gramm Platin ein Kilowatt elektrische Energie zu erzeugen. Zum Beispiel gewinnen in zahlreichen Bakterien und Mikroalgen Hydrogenasen genannte Enzyme Wasserstoff aus Wasser – mit Nickel oder Eisen im katalytischen Zentrum. Chemiker lassen sich nun davon zu Katalysatoren inspirieren, die einige der strukturellen und funktionellen Eigenschaften ihrer natürlichen Vorbilder besitzen.

Diesen »biomimetischen« Ansatz verfolgen auch zwei von uns: Marc Fontecave und Vincent Artero im Labor für Chemie und Biologie der Metalle der Universität J. Fourier in Grenoble (CEA-CNRS Grenoble). Indem sie biomimetische Chemie mit Nanotechnologien kombinierten, entwickelten sie kürzlich ein gänzlich edelmetallfreies Material, das sowohl Wasserstoff aus Wasser liefert wie auch den umgekehrten Prozess katalysiert. Dafür betteten sie ein Nickelatom in ein Molekül, das Hydrogenasen nachahmt. Das wiederum brachten sie auf Kohlenstoffnanoröhrchen auf, was große Oberflächen und hohe elektrische Leitfähigkeit ergab (siehe Grafik S. 80).

Dieses Experiment, das in Zusammenarbeit mit Serge Palacin und Bruno Jousselme aus dem Labor für Chemie der Oberflächen und Schnittstellen (CEA Saclay) gelang, war ein Erfolg: Als Beschichtung einer Elektrode erwies sich das

Material als robust und geeignet für das saure Milieu einer PEM. Zwar sind die bis jetzt möglichen Stromdichten noch 100- bis 1000-mal geringer als jene, die mit Platin erreicht werden, doch der biomimetische Katalysator wird auf jeden Fall kostengünstiger sein. Überdies verträgt er Kohlenmonoxid, das Wasserstoff oft verunreinigt, vor allem wenn dieser aus Biomasse erzeugt wurde.

Biomimetik könnte auch die Entwicklung neuer Protonaustauschmembranen voranbringen. Bis jetzt bestehen diese meist aus einem sulfonierten perfluorierten Polymer (das bekannteste ist Nafion, das seit den 1960er Jahren von der Firma DuPont vermarktet wird). Fluor erhöht allerdings die Produktionskosten und setzt eine effiziente Wiederverwertung voraus. Dabei findet in allen Lebewesen ein Transport von Protonen durch Membranen statt – es gibt also auch hier biologische Vorbilder. Thomas Berthelot und seinen Kollegen vom CEA in Saclay ist es gelungen, mit einer präparierten Membran die Struktur der Protonenpumpen nachzuahmen, die in Mitochondrien Teil der Energie liefernden Atmungskette sind. Die Hoffnung ist, dass solche Materialien in nicht zu ferner Zukunft mit Nafion konkurrieren können, dabei aber weniger zum Austrocknen neigen und mechanisch stabiler sind.

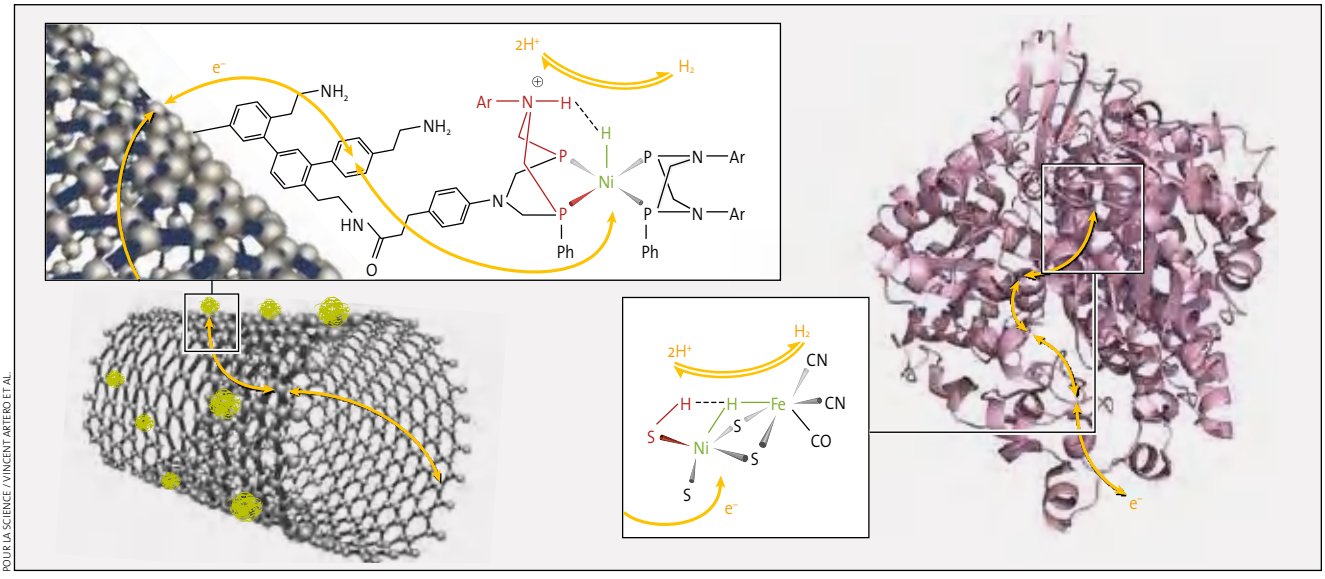
Doch die kostengünstige Herstellung des Gases ist nur ein Aspekt – so muss Wasserstoff auch komfortabel und sicher gespeichert und bereitgestellt werden. Die bei vielen industriellen Anwendungen genutzte Verflüssigung kommt nicht in Frage, denn um die erforderlichen minus 253 Grad Celsius (bei Normaldruck) zu erreichen und dauerhaft aufrechtzuerhalten, erforderte sie nahezu halb so viel Energie, wie in den Wasserstoffmolekülen überhaupt gespeichert ist. Hinzu kommen Verluste durch Verdampfen während der Lagerzeit.

Wasserstoffgas lässt sich aber komprimieren, und der Transport in Druckgasflaschen aus Edelstahl oder Aluminium bei einem Druck bis 20 Megapascal ist gängige Praxis. Für Automobiltanks entwickeln Forscher nun Hochdruckbehälter, die 35 bis 70 Megapascal aushalten – das 350- bis 700-Fache des Luftdrucks – und etwa 5000 Füll- und Entleerungszyklen sicher und effizient leisten. Ein Problem dabei ist, dass dieses Gas durch viele Metalle diffundieren kann und dabei deren Korrosion fördert. Als Alternative bauten die Wissenschaftler vom CEA daher einen Pkw-Tank für 4,2 Kilogramm Treibstoff aus Kunststoffguss.

Speichern im Kristallgitter

Ein anderer Ansatz nutzt gerade diese Eigenschaft des Wasserstoffs, in metallische Strukturen einzudringen und dort Plätze des Kristallgitters zu besetzen – es entsteht ein Metallhydrid. Einen solchen Feststoffspeicher entwickelt das französische Unternehmen McPhy-Energy. Es nutzt dabei Ergebnisse von einem von uns, Daniel Fruchart, Materialwissenschaftler am Institut Néel des CNRS in Grenoble: Ein Werkstoff, der großenteils aus metallischem Magnesium (Mg) besteht, wird zu Magnesiumhydrid (MgH_2), wenn er Wasserstoff bei einem Druck von einem Megapascal ausge-

Der nickelbasierte Katalysator (Formel links oben), den Vincent Artero und seine Kollegen entwickelt haben, imitiert eine Hydrogenase (rechts): ein Enzym, wie es einige Bakterien und Mikroalgen nutzen, um Wasserstoff aus Wasser zu gewinnen und umgekehrt. Der Reaktionsweg ist hier angedeutet: Im Enzym leiten metallische Gruppen (nicht dargestellt) die Elektronen (e^-) zum aktiven Zentrum (grün), das aus einem Nickel- (Ni) und einem Eisenatom (Fe) besteht. Dort kommt die jeweilige Umwandlung in Gang. Der künstliche Katalysator wird auf Kohlenstoffnanoröhrchen (unten links) aufgebracht, das die Elektronen zu seinem Nickelzentrum leitet.



POUR LA SCIENCE / VINCENT ARTERO ET AL.

MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de

Unsere Themenseite »Energie«
finden Sie unter

www.**spektrum.de**/energie

setzt ist. Er absorbiert dabei mehr als sechs Prozent seines Eigengewichts an Wasserstoff. Dieser wird freigesetzt, sobald der Druck unter 0,2 Megapascal sinkt.

Forscher experimentieren auch mit Latentwärmespeichern (Phase Change Material, PCM), also Materialien, die Wärme speichern, indem sie ihren Aggregatzustand ändern und diese Wärme auch wieder abgeben können. Dergleichen ist heutzutage in vielen Haushalten anzutreffen: Gele, die man in der Mikrowelle erhitzt, werden flüssig und wärmen im Winter die Hände, während sie wieder fest werden. Die Aufnahme des Wasserstoffs im Metallgitter erfolgt spontan, und dabei entsteht Wärme, die das PCM absorbiert. Während der Gasentnahme gibt es sie wieder ab, was den Austritt des Gases aus dem Kristallverbund erleichtert. Die H_2-Abgabe geht damit deutlich schneller, allerdings nimmt die PCM-Hülle noch so viel Platz ein, dass bei einem so aufgerüsteten Container nur noch ein Zehntel des Volumens für den Wasserstoff zur Verfügung steht. Hier ist noch einiges an Entwicklung erforderlich.

Metallhydride erfordern keinen Energie verbrauchenden Kompressor wie Druckgasbehälter. Auch für den Einsatz in Privathäusern oder Tankstellen taugen sie, einerlei ob man dort Wasserstoff mit Solarzellen oder Windrädern herstellt oder damit nur beliefert wird. Der Nachteil aber ist das hohe Gewicht, weshalb Metallhydridspeicher in Fahrzeugen noch auf sich warten lassen. Einen Kompromiss sucht der Automobilhersteller Toyota gemeinsam mit den Grenobler Forschungseinrichtungen LITEN (CEA) und Institut Néel: Sie kombinieren einen Verbrennungsmotor mit einem Brennstoffzellenantrieb und nutzen für diesen einen Feststoffspeicher auf der Basis von Titan-, Vanadium- oder Chromhydriden in Kombination mit einem 300-Bar-Druckgasspeicher. Mit Tankgewicht und Tankvolumen vergleichbar einem herkömmlichen Pkw soll das eine Reichweite von 600 Kilometern ergeben. Die Energieausbeute sei gut, die Kosten niedriger als für Lithiumbatterien, wie sie gegenwärtig in Elektrofahrzeugen eingebaut sind. Auch ließe sich solch ein Tank schneller aufladen als ein Akku. Allerdings fallen hohe Materialkosten an. Immerhin testet man solche Komponenten bereits in Pkws, obwohl sie vor wenigen Jahren noch den ganzen Kofferraum und die hinteren Sitze eines Minivans in Anspruch nahmen.

Als Energiepuffer bei der Nutzung regenerativer Quellen werden diese Technologien aber zunächst wohl vor allem in Nischenmärkten wie bei der Versorgung abgelegener Siedlungen zum Einsatz kommen, also überall dort, wo es kaum Alternativen zur Sonnen- oder Windenergie gibt. Doch wird sich dies im Lauf der kommenden Jahre allmählich ändern – Wasserstoff bietet zu viele Vorteile als Zwischenspeicher. Obendrein ermöglicht eine Wasserstoffwirtschaft die Möglichkeit zur dezentralen Energieversorgung. Für den amerikanischen Ökonomen Jeremy Rifkin verbindet sich damit mehr als eine Option für die Zukunft. Er spricht in seinem Buch »Die dritte industrielle Revolution« von einer Chance der »Demokratisierung von Energieerzeugung und -verteilung«. Wenn Millionen Menschen selbst zu Energieerzeugern werden, entfällt der Aufbau großer und kostspieliger Produktionsanlagen und Verteilungsnetze. Das würde auch Strom- und Spannungsverluste reduzieren, die während der Verteilung auftreten.

Gewiss könnte der Übergang vom jetzigen Modell der Energieversorgung zu einer dezentralen nur schrittweise verlaufen. Zunächst dürften die von Solarmodulen oder Windrädern bedeckten Flächen noch wachsen, und ein Netz aus Pipelines wird das dort produzierte Wasserstoffgas zu den Verbrauchern leiten. Aber es sind bereits alternative Konzepte am Start, beispielsweise in Kalifornien und Norwegen: Dort warten kleine Wasserstoffherstellungssysteme an Tankstellen entlang großer Verkehrsadern auf ihre Nutzer. Bis jetzt handelt es sich nur um Prototypen, doch das ist immerhin schon ein Anfang. ~

DIE AUTOREN

Vincent Artero (von links nach rechts) forscht am Laboratoire de Chimie et Biologie des Métaux des Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA, Forschungszentrum für Kernenergie und alternative Energien) in Grenoble. **Nicolas Guillet** ist dort Forschungsingenieur im Laboratoire d'Innovation pour les Technologies des Energies Nouvelles et les nanomatériaux (LITEN). **Daniel Fruchart** ist emeritierter Forschungsleiter am Institut Néel des CNRS in Grenoble und wissenschaftlicher Direktor der französischen Firma McPhy-Energy. **Marc Fontecave** lehrt Chemie der biologischen Prozesse am Collège de France in Paris.

QUELLEN

Le Geoff, A. et al. (Hg.): From Hydrogenases to Noble Metal-Free Catalytic Nanomaterials for H_2 Production and Uptake. In: Science 326, S. 1384–1387, 4. Dezember 2009

Lucchese, P.: L'hydrogène est-il incontournable? In: Pour la Science, Dossier 69, S. 112–117, 2010

Menanteau, P. et al.: Une analyse économique de la production d'hydrogène pour des usages transport à partir d'électricité éolienne. In: Revue de l'Énergie 61, S. 322–333, 2010

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1146814**

»Wir wollen die Welt retten«

Bessere Katalysatoren sind der Schlüssel für bessere Elektrolyseure und Brennstoffzellen – und damit auch für die effiziente Speicherung elektrischer Energie im Rahmen einer Wasserstoffwirtschaft. Ihre Entwicklung hat sich **Robert Schlögl** zur Aufgabe gemacht. Im Interview erläutert der renommierte Chemiker, warum Katalysatoren so kompliziert sind und welche Bedeutung vernetzte Forschung hat.

Spektrum der Wissenschaft: Herr Professor Schlögl, es ist sehr schwer, Sie in Ihrem Büro anzutreffen. Sind Sie viel unterwegs?

Prof. Dr. Robert Schlögl: Ja, ich habe derzeit zwei Teams und pendle deshalb zwischen Berlin und Mülheim an der Ruhr – natürlich mit der Bahn, um möglichst wenig zu den Kohlendioxidemissionen beizutragen.

Aber wozu der Aufwand?

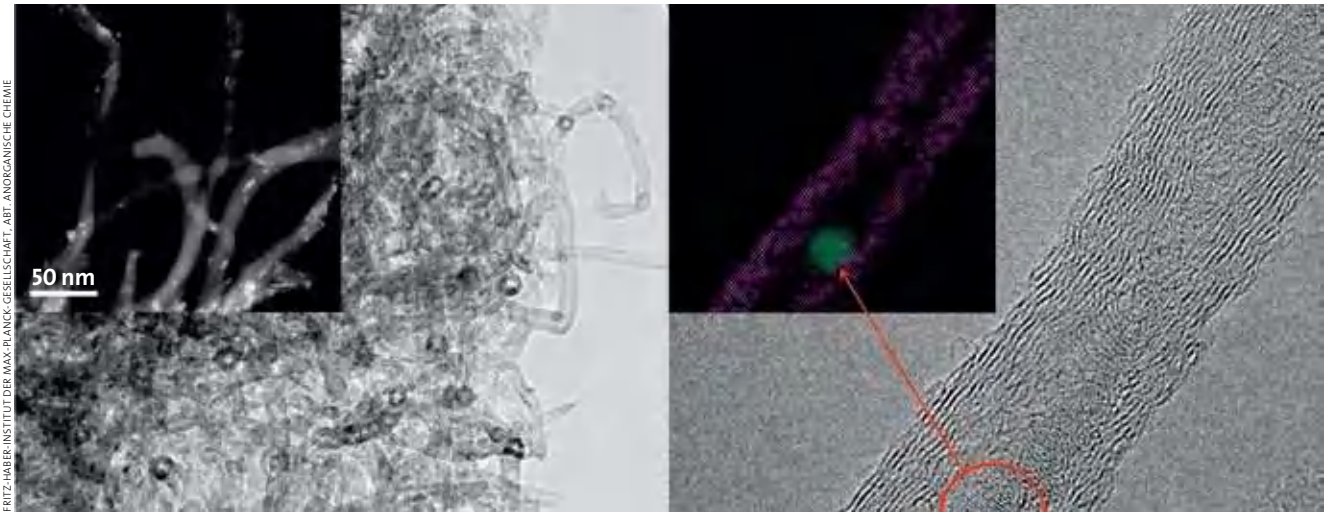
Schlögl: Weil wir bisher getrennte Kompetenzen zusammenbringen wollen. So gibt es am Institut in Mülheim Erfahrung damit, die Fotosynthese nachzuahmen. Jetzt kombinieren wir dieses Knowhow mit dem über konventionelle Katalysatoren am Fritz-Haber-Institut.

Hofft die Max-Planck-Gesellschaft, auf diese Weise Deutschlands Energieprobleme zu lösen?

Schlögl: Ja, denn um Wind- und Sonnenenergie optimal zu nutzen, muss man sie zwischenspeichern können – indem etwa ein Elektrolyseur Wasser zerlegt, der Wasserstoff dann in Tanks gespeichert und später mit einer Brennstoffzelle wieder in Strom umgewandelt wird. Wir konzentrieren uns auf den ersten Teil dieses Zyklus, auf die Elektrolyse. Wobei Brennstoffzellen bezüglich der Katalysatoren nur die Kehrseite derselben Medaille darstellen.

Geht es dabei um Verbesserungen im Detail oder um Grundlegendes?

Schlögl: Seit gut 30 Jahren untersucht man inzwischen, wie Katalysatoren arbeiten. Es gibt ausgetüftelte Modelle dazu. Doch wenn es darum geht, Oberflächen- und Quantenphysik in großtechnische Prozesse zu übertragen, gehen die Berechnungen meist völlig an der Realität vorbei. Heute kennen wir



FRITZ-HABER-INSTITUT DER MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT, ABT. ANORGANISCHE CHEMIE

Manganoxid-Cluster auf Kohlenstoffnanoröhren sollen die Elektrolyse katalysieren. Links eine Übersichtsaufnahme; im dazugehörigen Inset erscheinen die Cluster als helle Flecken, in der rechten Detailaufnahme einer Nanoröhre grün.

FRITZ-HABER-INSTITUT DER MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT [M]

Robert Schlögl leitet die Abteilung für anorganische Chemie am Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft (Berlin), dessen Direktor er ist. Seit 2011 ist Schlögl auch Gründungsdirektor des neuen Max-Planck-Instituts für chemische Energiekonversion in Mülheim an der Ruhr.

den Grund: Die Moleküle der reagierenden Stoffe sitzen nicht einfach auf der Oberfläche des Katalysators, wie man früher dachte, sondern beeinflussen dessen eigene Moleküle, wodurch sich sogar seine chemische Zusammensetzung verändert. Dieser Prozess hängt zudem vom Druck ab: Bei mehr als einem Tausendstel des Atmosphärendrucks findet Katalyse statt, darunter nicht. Das ist erst seit Kurzem bekannt.

Im Kontext Elektrolyse hat man sich zudem früher nur die Wasserstoffelektrode angeschaut und diese optimiert, weil dort ja sozusagen geerntet werden soll. An dieser Elektrode läuft auch alles nach Lehrbuch ab. Mittlerweile wissen wir aber, dass sich die Sauerstoffelektrode ganz unerwartet verhält. Bei der elektrochemischen Reaktion reagiert der Katalysator Platin nämlich mit dem Sauerstoff. Mit anderen Worten: Das Edelmetall rostet, und das verschlechtert die Ausbeute.

Sicher haben Sie schon ein Konzept, wie man das umgehen kann.

Schlögl: Zunächst kommt mir eine Standardlösung in den Sinn: Passivierung verhindert Korrosion. Dazu bringt man eine dünne Schicht aus einem anderen Metall auf, die oxidiert und nun weiteren Sauerstoff fernhält. In Frage kämen hierfür Iridium und Ruthenium, aber die sind selten und daher zu teuer. Wir gehen deshalb einen anderen Weg und entwickeln biomimetische Katalysatoren.

Was ist damit gemeint?

Schlögl: Biomimetisch bedeutet: Prinzipien aus der Natur werden in technische Verfahren übersetzt. Wir imitieren die Fotosynthese in Blättern. Auch dort findet Katalyse statt, und dabei spielt Mangan eine zentrale Rolle. Also nehmen wir Kohlenstoff als elektrischen Leiter für unsere Elektrode, modifizieren aber seine Oberfläche mit Nanostrukturen aus Manganoxid. Diese Art von Kompositkatalysator gibt es in der Natur zwar nicht, sie funktioniert jedoch gut. Andere Forschergruppen untersuchen andere Paarungen. Weltweit ist inzwischen ein regelrechtes Wettrennen um die beste Kombination entbrannt.

Wie weit ist Ihr Ansatz noch von einer breiten Anwendung entfernt?

Schlögl: Noch sehr weit, sofern wir ihn allein in der Max-Planck-Gesellschaft weitertreiben müssen. Wenn wir allerdings kooperieren könnten, zum Beispiel mit der Fraunhofer-Gesellschaft, würden wir vielleicht schon in drei Jahren einen Elektrolyseur auf die Beine stellen, der ein Megawatt elektrische Leistung durch Spaltung von Wasser speichert.

Was sollte Sie daran hindern?

Schlögl: Das deutsche Wissenschaftssystem. Es fördert Kooperation leider nicht. Wissenschaftliche Reputation wird auf Einzelpersonen bezogen, und davon hängen dann die Fördermittel ab. Macht nichts, könnte man denken, dann stellt halt jede Gesellschaft eigene Anträge, und das Geld wird anschließend in einen gemeinsamen Topf geworfen. Aber das wäre eine verbotene Quersubventionierung. Vertreter aller deutschen Forschungseinrichtungen fordern mittlerweile Möglichkeiten, Vernetzungsprojekte zu finanzieren; passiert ist bisher aber noch wenig. Ich habe deshalb beim Bundesministerium für Bildung und Forschung einen Antrag gestellt, der die Max-Planck-Gesellschaft intern und mit den relevanten anderen Organisationen vernetzen soll, wobei die Themen von den Forschern definiert werden. Leider gab es dazu bis heute keine positive Reaktion. Das beantragte Volumen von 100 Millionen Euro mag groß erscheinen, ist aber wenig verglichen mit Vernetzungsprojekten in den USA, die mit zwei Milliarden Dollar pro Jahr gefördert werden. Wir wollen ja schließlich nicht weniger als die Welt retten.

Das Gespräch führte **Bernd Müller**, Wissenschaftsjournalist in Esslingen.

Vermehrungsfähige Maschinen

Was sind die wesentlichen Eigenschaften des Lebens, auf einer abstrakten Ebene betrachtet? Aufschlüsse könnte ein mathematisches Modell in Form eines zellulären Automaten geben. Ein solcher ist nun auf einem Computer realisiert worden – 60 Jahre nach dem ersten theoretischen Entwurf.

Von Jean-Paul Delahaye

> Lebende Organismen sind komplizierte Aggregate einfacher Bestandteile. Gemäß allen Theoremen der Wahrscheinlichkeitstheorie oder Thermodynamik sind sie sehr unwahrscheinlich. Der einzige Aspekt, der dieses Wunder erklären oder plausibel machen kann, ist die Tatsache, dass sie sich reproduzieren. Ist erst einmal ein Exemplar zufällig entstanden, so finden die Gesetze der Wahrscheinlichkeitsrechnung keine Anwendung mehr, weil dann viele Exemplare entstehen.
>
> *John von Neumann,*
> *Theory of Self-Reproducing Automata, 1966*

Es ist ein beliebtes Thema der Sciencefiction: Ein Roboter stellt eine perfekte Kopie seiner selbst her, ohne Instruktionen von außen zu benötigen. Seine Interaktion mit der Umwelt beschränkt sich darauf, dass er ihr Materie und Energie entnimmt. Unvermeidlich folgt im Roman das nächste Ereignis: Der neu geschaffene Roboter tut es seinem Erzeuger gleich, und alsbald vermehren sich die Blechwesen wie die Karnickel, die Killerbienen oder die Menschen.

Folgerichtig enden die meisten Romane in der großen Katastrophe. Aber von solchen düsteren Endzeitvisionen war die Aufbruchsstimmung Anfang der 1950er Jahre weit entfernt. Die Erbauer der frühen Computer in den USA begannen, die theoretisch ungeheure Leistungsfähigkeit ihrer Geräte zu erfassen und deren Grenzen auszuloten. Wäre es prinzipiell möglich, einen Roboter so zu programmieren, dass er nach einer Anleitung, die in ihm enthalten ist, sich selbst nachbaut? Und was wären dafür die minimalen Voraussetzungen?

Mit dieser Frage beschäftigte sich vor allem John von Neumann (1903–1957), der legendäre amerikanische Mathematiker ungarischer Abstammung, dem wir auch die Architektur der heute verbreiteten Computer verdanken. Sein Freund Stan Ulam (1909–1984), den er aus gemeinsamer Arbeit an der Entwicklung der Atombombe kannte, schlug ihm vor, das Problem im Rahmen einer vereinfachten abstrakten Welt zu studieren. Nach von Neumanns Tod führte Arthur W. Burks (1915–2008), einer der Entwickler des frühen amerikanischen Elektronenrechners ENIAC, dessen Ansätze fort und veröffentlichte sie 1966 in dem Buch »Theory of Self-Reproducing Automata«. Das Werk wurde berühmt und regte eine Vielzahl von Forschungsprojekten an.

Die abstrakte Welt, die Ulam seinem Freund nahegelegt hatte, war die der zellulären Automaten (Kasten rechts). Diese elementaren Rechner, die ein gedachtes unendliches Schachbrett bevölkern, sind mittlerweile Gegenstand einer eigenen wissenschaftlichen Disziplin im Grenzbereich von Mathematik und Informatik – und in der im Prinzip höchst primitiven Welt kann eine Menge passieren!

AUF EINEN BLICK

KÜNSTLICHES LEBEN – DIE FORTPFLANZUNG

1 Ein **zellulärer Automat** ist ein zweidimensionaler, fiktiver Raum mit physikalischen Gesetzen, die nach Belieben definierbar sind.

2 Eine zu einem Anfangszeitpunkt in einem zellulären Automaten gesetzte Konfiguration entwickelt sich in **diskreten Zeitschritten** deterministisch und einfach berechenbar auf Grund von **lokalen Wechselwirkungen**.

3 Manche Konfigurationen **reproduzieren sich selbst**, das heißt, sie erscheinen nach einer gewissen Anzahl von Zeitschritten in mehreren Exemplaren.

4 Für ein brauchbares, gleichwohl immer noch sehr abstraktes Modell des Lebens muss zur Selbstreproduktion noch eine gewisse **minimale Komplexität** sowie die Fähigkeit zur **Mutation** hinzukommen.

In der Tat gelang es von Neumann, einen zellulären Automaten mit einer Konfiguration zu finden, die sich selbst repliziert. (In der Fachsprache unterscheidet man die Replikation, die absolut genaue Verdoppelung, von der Reproduktion, bei der die Kinder sich von ihren Eltern unterscheiden dürfen.) Sie ist allerdings aberwitzig kompliziert. Obendrein hat von Neumann sie zwar mathematisch korrekt definiert, aber nicht angegeben, wie sie Zelle für Zelle zu realisieren wäre.

Diese überaus mühsame Detailarbeit haben erst 1995 Renato Nobili an der Università di Padova und Umberto Pesavento an der Princeton University geleistet. Um die Sache zu vereinfachen, veränderten sie von Neumanns Entwurf geringfügig: Ihre Zellen können 32 statt 29 verschiedene Zustände annehmen. Die selbstreplizierende Konfiguration besteht aus 6329 Zellen plus einem 145 315 Zellen langen Band, das vergleichbar dem Erbgut von Lebewesen eine Konstruktionsanweisung zum Ablesen enthält. Ein Fortpflanzungszyklus, das heißt das Duplizieren der Konfiguration einschließlich des Bands, erfordert 63 Milliarden Zeitschritte. Jahrzehntelang hätte die verfügbare Rechenleistung nicht ausgereicht, um die Konstruktion von Nobili und Pesavento in akzeptabler Zeit auf einem Computer nachzuvollziehen; dieser Kraftakt ist erst vor wenigen Jahren gelungen.

Inzwischen ist auch von Neumanns originale Konstruktion mit 29 Zuständen ausgearbeitet und programmiert worden. William R. Buckley, der 2000 seine Masterarbeit über ein Problem in diesem Zusammenhang geschrieben hatte, arbeitete an dem von ihm gegründeten California Evolution Institute die Einzelheiten aus. Die sich selbst replizierende Konfiguration umfasst 18 589 Zellen, das Kodierungsband besteht aus 294 844 Zellen, und eine Verdopplung benötigt

Zelluläre Automaten und das Spiel des Lebens

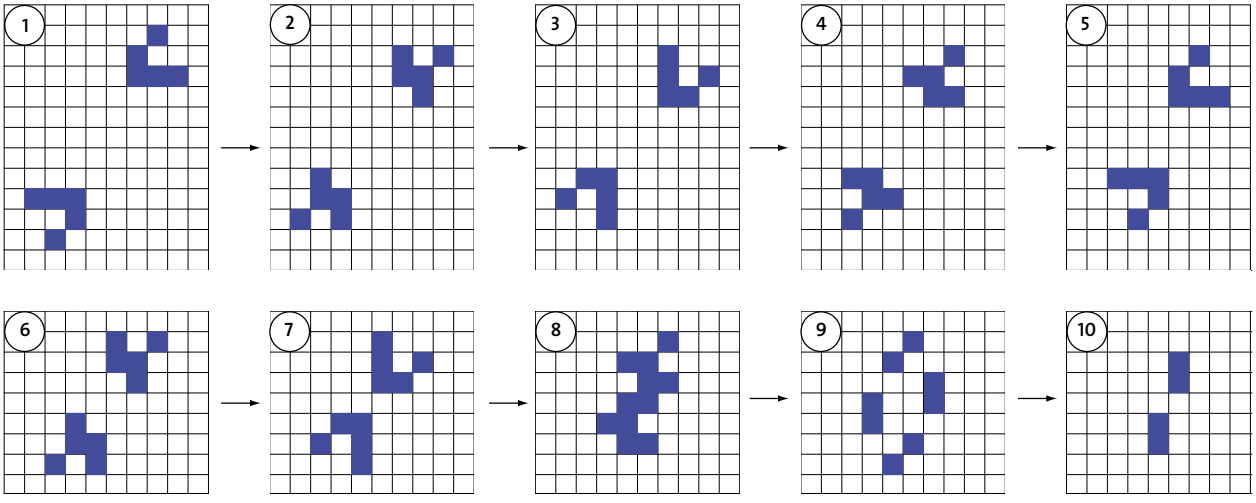
Ein zellulärer Automat besteht aus einem – im Prinzip unendlich großen – Schachbrett; auf jedem Feld (jeder »Zelle«) sitzt eine kleine Maschine (ein »Automat«). Alle Automaten sind gleich.

Ein Automat befindet sich zu jedem Zeitpunkt in einem von endlich vielen, vorab festgelegten Zuständen. Die Zeit verläuft in diskreten Schritten; und zwar hängt der Zustand jedes Automaten zum Zeitpunkt $t+1$ nach einer bestimmten Funktion von seinem eigenen Zustand und von dem seiner Nachbarn zum Zeitpunkt t ab.

Typischerweise erklärt man zu Nachbarn die acht Felder, die – über Kante oder über Eck – an das aktuelle Feld angrenzen. Andere Nachbarschaftsdefinitionen sind möglich und gehören ebenso wie die Funktion, die den neuen Zustand jedes Automaten aus dem alten errechnet, zu den »Naturgesetzen«, die der Schöpfer dieser primitiven Kunstwelt nach seinem Belieben bestimmen kann.

Der meistuntersuchte zelluläre Automat ist der zum »Spiel des Lebens« (»Game of Life«) von John Conway. Seine Zellen haben die zwei Zustände »tot« (weiß) und »lebendig« (blau). Hat eine lebende Zelle zwei oder drei lebende Nachbarn, so bleibt sie am Leben, andernfalls stirbt sie. Hat eine tote Zelle genau drei lebende Nachbarn, so wird sie lebendig, andernfalls bleibt sie tot.

Diese einfachen Regeln erzeugen eine überraschend reichhaltige Dynamik. Insbesondere gibt es »Gleiter«, Anordnungen, die diagonal über das Brett wandern und dabei in regelmäßigen Abständen immer wieder dieselbe Gestalt annehmen. In der abgebildeten Folge der Ereignisse prallen zwei Gleiter aufeinander und vernichten sich dabei gegenseitig: Im elften Zeitschritt sind alle Zellen tot.



ALLE ABBILDUNGEN DES ARTIKELS: POUR LA SCIENCE

261 Milliarden Schritte. Heute kann jedermann mit Hilfe des kostenfreien Programms Golly auf dem PC in wenigen Viertelstunden dieses bemerkenswerte mathematische Theaterstück verfolgen, das mehr als 50 Jahre unspielbar war. Das gilt sowohl für die Version von Nobili und Pesavento als auch für die von Buckley. Letztere kommt derjenigen von Neumanns näher, ist aber auch heute noch viel langsamer.

Vereinfachte Modelle

Es geht allerdings auch viel einfacher. Christopher Langton hat 1984 eine Konfiguration gefunden, die zu Beginn aus bescheidenen 86 Zellen besteht und sich gleichwohl selbst reproduziert. Diese Entdeckung und weitere, die ihr folgten, lassen von Neumanns komplexe Konstruktion auf den ersten Blick hoffnungslos ungeschickt erscheinen. Erst wenn man sie im Kontext seiner Zeit betrachtet und von Neumanns am lebenden Vorbild orientierte Vorstellungen miteinbezieht, kann man sie als wissenschaftlichen Durchbruch ersten Ranges erkennen und würdigen.

Damit man überhaupt von Selbstreplikation sprechen kann, muss man den Schauplatz des Geschehens festlegen, sprich eine »Welt« mit präzisen »physikalischen Gesetzen«. Das kann unsere Welt sein oder aber auch eine vereinfachte, deren Gesetze durch wenige mathematische Regeln eindeutig und erschöpfend beschrieben werden. Unter diesen künstlichen Einfachwelten sind aus mehreren Gründen die zellulären Automaten besonders reizvoll.

Erstens sind sie »diskrete Welten«: Sowohl Ort als auch Zeit sind keine kontinuierlichen Variablen, sondern nehmen »diskrete« Werte an, das heißt solche, deren Differenz nicht beliebig klein wird. Das macht sie einfach programmierbar, vor allem weil im Gegensatz zur echten Welt die ganze Differenzialrechnung mit ihren begrifflichen und rechnerischen Schwierigkeiten entbehrlich ist. Zweitens sind in einem zellulären Automaten – wie in unserem Universum – alle Wechselwirkungen lokal: Ein Punkt wirkt auf einen anderen, weit entfernten, nicht unmittelbar und schon gar nicht ohne Zeitverzug, sondern stets nur durch Vermittlung dazwischenliegender Punkte. Drittens dürfen die Gesetze, die man zu Grunde legt, extrem einfach sein, was den entsprechenden zellulären Automaten nicht hindert, ein überaus komplexes Verhalten zu zeigen. Konrad Zuse (1910–1995), der Erfinder des ersten programmierbaren Rechners, ging sogar so weit, in seinem »Rechnenden Raum« von 1967 das ganze Universum als einen zellulären Automaten – mit ungeheuer kleinen Zellen – zu interpretieren (Spektrum der Wissenschaft Spezial 3/2007 »Ist das Universum ein Computer?«, S. 6).

Hat man sich auf ein Universum – zum Beispiel einen zellulären Automaten – festgelegt, bleibt zu definieren, was genau unter Selbstreplikation zu verstehen ist. Mathematiker neigen dazu, eine solche Definition auf das absolut Unerlässliche zu beschränken, um nicht aus Versehen einen möglicherweise interessanten Fall auszuschließen. Insbesondere soll dadurch nicht schon ein spezielles Verfahren festgelegt werden. Dementsprechend würde man definieren:

Selbstreplikation findet statt, wenn ein Objekt, das in Gestalt eines einzigen Exemplars vorliegt, später in mehreren Exemplaren anzutreffen ist.

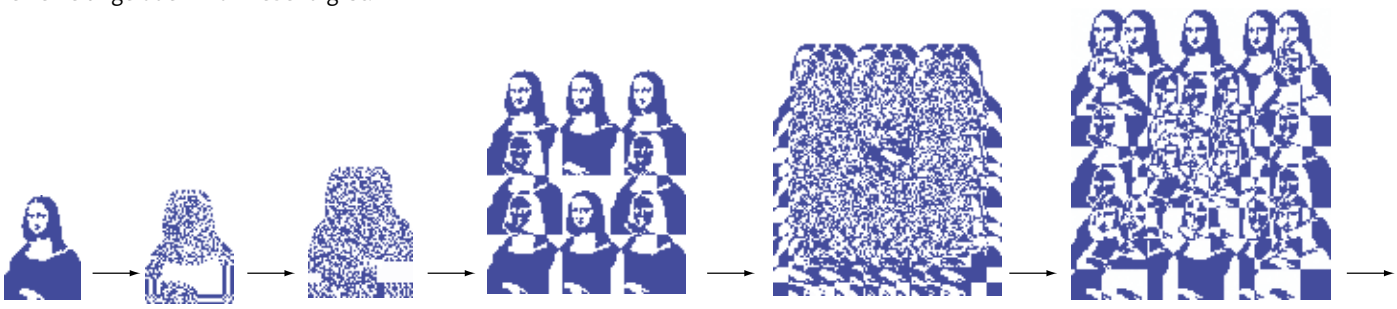
Diese Bestimmung stellt sich allerdings sehr rasch als unbrauchbar heraus. Sie schließt nämlich Prozesse ein, die bereits unmittelbar durch die Festlegung der Gesetze erzwungen werden. Nehmen wir als Beispiel einen zellulären Automaten namens »Trivial« mit dem folgenden Gesetz:

Ein überraschend einfacher Vervielfältigungsautomat

Edward Fredkin, Serafino Amoroso und Gerald Cooper verdanken wir eine erstaunliche Entdeckung: einen zellulären Automaten namens Replicator, der von jeder beliebigen noch so komplexen Struktur perfekte Kopien erzeugt. Die Regeln für diesen Automaten lauten: Eine Zelle ist entweder lebendig (blau) oder tot (weiß). Sie ist im nächsten Zeitschritt genau dann lebendig, wenn im aktuellen unter ihren acht Nachbarzellen eine ungerade Anzahl lebendig ist.

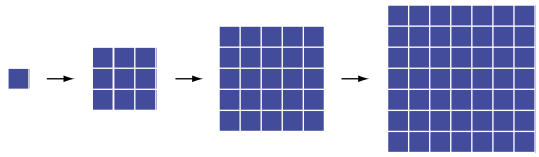
Aus der Ausgangsanordnung (hier eine in Pixel aufgelöste Silhouette der Mona Lisa) wird nach 256 Schritten dasselbe Muster in achtfacher Ausfertigung. Es ist nicht schwer zu beweisen, dass jede Ausgangsanordnung in dieser Weise vervielfältigt wird.

Das Prinzip lässt sich verallgemeinern. An Stelle von zwei darf die Anzahl der Zustände des Automaten eine beliebige Primzahl p sein. Die Regel lautet dann: Man nehme die Summe der Zustände



➤ Eine Zelle ist entweder tot (weiß im Bild unten) oder lebendig (blau).

➤ Eine Zelle bleibt im Zeitpunkt $t+1$ lebendig, wenn sie dies zur Zeit t war; eine tote Zelle wird zum Leben erweckt, wenn eine ihrer acht Nachbarzellen lebendig ist.



Wenn es zum Zeitpunkt $t=0$ im ganzen Universum eine einzige lebende Zelle gibt, dann erhält man nacheinander 9, 16, 25, 36 ... Exemplare dieses Urobjekts. Nach der obigen naiven Definition ist das ein Fall von Selbstreplikation. Allerdings ist sie so einfach, dass wir nichts von ihr lernen!

Obendrein dürfte man diesen zellulären Automaten auch als sehr grobes Modell unseres Universums nicht zu wörtlich nehmen. Dass aus nichts etwas entsteht, das verhindern im echten Universum bereits die Erhaltungssätze für Materie und Energie. Man könnte zwar im Prinzip einen stehenden Dominostein als »tot«, einen umgefallenen als »lebendig« definieren und daraufhin die Kettenreaktion, die man bei den sorgfältig arrangierten Domino-Fernsehshows bewundern kann, als Selbstreplikation bezeichnen – aber das wäre ziemlich albern.

Immerhin könnte der zelluläre Automat Trivial als Modell für die Ausbreitung einer Schimmelpilzkolonie dienen – mit gewissen Verfeinerungen, denn Schimmelpize pflegen sich nicht in Form eines Quadrats auszubreiten. Das würde allerdings immer noch keinen großen Erkenntnisgewinn bringen. Schon etwas besser würde sich der Einfachautomat als Modell für den Mechanismus eignen, der dem Rinderwahnsinn zu Grunde liegt. Die krankhaften Prionen namens Prp^{Sc} vervielfachen sich, indem sie Prionen mit der unschädlichen Konformation Prp^{c} bei Kontakt in ihresgleichen verwandeln – genau so, wie eine blaue Zelle des Automaten Trivial die sie umgebenden weißen Zellen verändert.

Diese primitive Form der Selbstreplikation funktioniert nur mit sehr einfachen Objekten. Aber selbst größere Einheiten schützen nicht vor Trivialität. Der folgende Extremfall lässt sich in der Robotik einfach realisieren: Ein Roboter namens *A-B* besteht aus den zwei Teilen *A* und *B*, zum Beispiel aus einem Kopf und einem Rumpf. Jedes Teil ist für sich genommen handlungsunfähig. Nehmen wir an, dass *A* und *B*, sowie sie einander nahekommen, Anziehungskräfte aufeinander ausüben, zum Beispiel mittels Magneten, und sich daraufhin von selbst zum einem funktionsfähigen *A-B* zusammenkoppeln. Unterstellen wir weiter, dass die Teile *A* und *B* massenhaft in der Gegend herumliegen. Dann muss man nur noch einen *A-B* darauf programmieren, dass er ein *A* und ein *B* findet und zusammenbringt, und schon vermehren sich die *A-B* wie die Karnickel.

Fredkins Replicator repliziert einfach alles

Das ist immer noch weit entfernt von der Vermehrungsweise der Lebewesen, aber nicht mehr ganz so abwegig. Dass sich ein Objekt durch Anziehungskräfte automatisch an den richtigen Platz bewegt, kennen wir von der Anlagerung der Atome an einen wachsenden Kristall. Und Viren entstehen dadurch, dass sich ihre Bestandteile mehr oder weniger von selbst zusammenfügen; allerdings hat das »Muttervirus« die Bestandteile nicht aufgesammelt, sondern ihre Herstellung der Wirtszelle »in Auftrag gegeben«.

Wenn wir also die Suche nach selbstreplizierenden Maschinen etwas genauer auf das lebende Vorbild ausrichten wollen, sollten wir den Roboter *A-B* nicht kategorisch ausschließen. Aber unsere naive Definition ist durch einige Einschänkungen zu ergänzen:

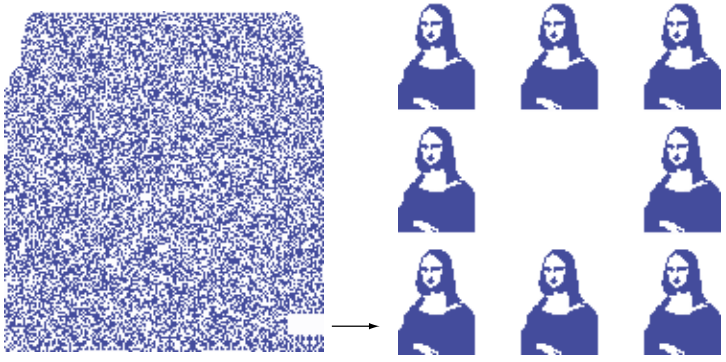
Das sich selbst replizierende Objekt darf nicht zu einfach sein, und es darf nicht schon dadurch entstehen, dass einige wenige bereits in seiner Umgebung vorhandene komplexe Bestandteile zusammengebracht werden.

Interessanterweise ist selbst damit die Selbstreplikation nicht auf die Art und Weise eingeschränkt, welche die Lebewesen praktizieren, weder in der realen Welt noch in der künstlichen.

Betrachten wir zuerst die letztere. Es gibt eine Familie von einfachen zellulären Automaten mit einer sehr überraschenden Eigenschaft, die von Neumann nicht kannte (sonst hätte er sie zweifellos erwähnt): Jede beliebig komplexe Konfiguration, die sich zum Zeitpunkt $t=0$ auf dem Schachbrett befindet, erscheint in mehreren Exemplaren wieder, wenn man nur lange genug wartet, eine Weile später in noch mehr Exemplaren, und so weiter. Der einfachste dieser zellulären Automaten ist der »Replicator« von Ed Fredkin, einem der frühen Computerpioniere und »Digitalphilosophen« (siehe Kasten links).

der acht Nachbarzellen zum Zeitpunkt *t*. Der Zustand jeder Zelle im Zeitpunkt $t+1$ ist gleich dieser Summe modulo *p*, das heißt, man nehme den Rest bei der Division durch *p*.

Auch die Anzahl der Kopien ist nicht auf acht festgelegt, sondern kann beliebig vorgegeben werden.



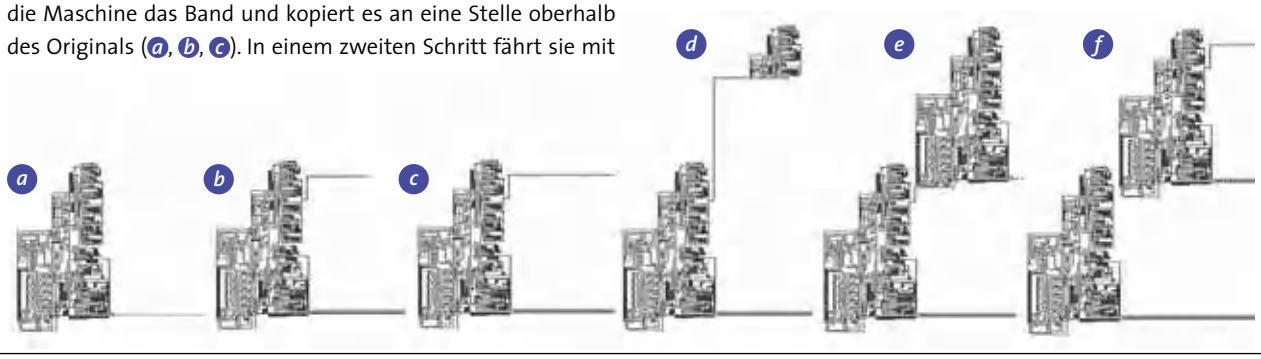
Der fortpflanzungsfähige Automat

John von Neumann erfand einen zellulären Automaten mit einer selbstreplizierenden Konfiguration, die so komplex ist, dass ihre Aktivität auf den damals verfügbaren Rechnern nicht nachvollziehbar war – von Papier und Bleistift ganz zu schweigen. Das gelang erst 2008 mit einer geringfügigen Abwandlung, die Renato Nobili und Umberto Pesavento 1995 formulierten und die Tim Hutton im Detail programmierte. Eine große Fangemeinde für zelluläre Automaten stellt dieses Programm und viele andere auf der Website golly.sourceforge.net bereit.

In der Version von Nobili und Pesamento besteht die Konfiguration aus zwei Teilen: einer Maschine, welche die Replikation ausführt, und einem Band, das in kodierter Form den Plan der Maschine enthält. Dieses an ein Genom erinnernde Band ist extrem lang und hier nur teilweise abgebildet.

Die Selbstreplikation verläuft in zwei Phasen. Zunächst liest die Maschine das Band und kopiert es an eine Stelle oberhalb des Originals (a, b, c). In einem zweiten Schritt fährt sie mit einer Art beweglichem Arm – der aus Zellen der Maschine besteht – an der Kopie des Bands entlang, interpretiert die darauf verzeichneten Daten und setzt nach deren Anweisung Zelle für Zelle die neue Maschine zusammen (d, e, f). Sowie diese zweite Phase beendet ist, setzt sich die neue Maschine in Gang und produziert ihrerseits eine Kopie ihrer selbst sowie ihres Bands.

Das »Spiel des Lebens« von John Conway, der bestuntersuchte zelluläre Automat überhaupt, verfügt über zahlreiche universelle Eigenschaften. Daraus folgt, dass es auch in dieser künstlichen Welt eine sich selbst replizierende Anfangskonfiguration geben muss. Allerdings ist dieser Existenzbeweis nichtkonstruktiv, gibt also keinen Hinweis, wie diese Konfiguration zu finden wäre. Dies ist bis heute auch noch niemandem gelungen.



Es ist faszinierend, dem Replicator bei seiner Dynamik zuzusehen. Chaos scheint zu herrschen, bis von einem Zeitschritt zum nächsten plötzlich die Ursprungsstruktur makellos und in vielfacher Ausfertigung auf dem Bildschirm erscheint. Aber es ist nicht schwer zu beweisen, dass genau das eintreten muss. Letztlich ist das spektakuläre Phänomen die Konsequenz einer arithmetischen Eigenschaft des Systems, die nichts mit der belebten Welt zu tun hat und von dieser selbstverständlich auch nicht genutzt wird.

Kopierer, die sich selbst kopieren

Nun zur realen Welt. Hier gibt es auch nichtbiologische Formen der Replikation; die geläufigste ist der Fotokopierer. Er dupliziert auch sehr komplexe Dinge, die auf dem Original geschrieben oder gedruckt sind. Es gibt sogar dreidimensionale Kopierer, die Objekte durch Stereolithografie reproduzieren. Stellen wir uns einen solchen Apparat nach dem Vorbild vieler Sciencefiction-Romane so perfektioniert vor, dass er jedes Objekt Atom für Atom duplizieren kann. Ein Bewohner dieser Zukunftswelt könnte sich dann – unerotisch, aber bequem – dadurch reproduzieren, dass er in einen Kopierer steigt und auf den Startknopf drückt. Selbstverständlich könnte sich ein Kopierer auch selbst vermehren.

Ein Extremfall der nichtbiologischen Selbstreproduktion komplexer Strukturen ist die Vielweltentheorie von Hugh Everett (Spektrum der Wissenschaft 4/2008, S. 24). Zu ihr gehört die Annahme, dass sich das gesamte Universum in jedem Augenblick selbst vervielfältigt und die verschiedenen Exemplare von da an unterschiedliche Entwicklungen durchlaufen.

Auf der Suche nach lebensähnlichen Formen der Selbstreproduktion müssen wir also unsere Definition noch weiter verschärfen. Bekanntlich trägt jede lebende Zelle eine Art Bauanleitung in ihrer DNA. Wenn sich ein lebender Organismus vermehrt oder auch nur eine Zelle sich teilt, werden einerseits Teile dieser Konstruktionsbeschreibung in Proteine übersetzt, die den neuen Organismus bilden. Andererseits wird sie selbst kopiert, damit auch der neue Organismus über die nötigen Informationen zu seiner Replikation verfügt. Dieser doppelte Mechanismus von Übersetzung und Kopie ist die Existenzgrundlage jedes lebenden Organismus. Folglich sollte ein Schema der Selbstreplikation, das uns helfen könnte, das Leben zu verstehen, nach diesem »genetischen Prinzip« funktionieren.

Das wusste schon von Neumann, und zwar lange bevor die Struktur der DNA entschlüsselt wurde. In der Tat funktionieren seine selbstreplizierenden zellulären Automaten im Original ebenso wie in der Version von Nobili und Pesavento nach dem Prinzip »Maschine plus Band« (Kasten oben). Dabei entspricht das Band (von dem im Kasten nur

ein sehr kleiner Teil dargestellt ist) dem Genom eines Lebewesens. Bei der Selbstvermehrung wird zunächst eine Kopie des Bands hergestellt und dann diese abgelesen und in eine zweidimensionale Struktur übersetzt. Der Kopierer kopiert gewissermaßen seinen eigenen Bauplan und konstruiert mit der Kopie als Vorlage ein zweites Exemplar seiner selbst.

Damit wird klar, warum sich von Neumann nicht mit einem zellulären Automaten vom Typ Trivial oder Replicator zufriedengeben konnte. Ist es aber möglich, das Prinzip »Maschine plus Band« einfacher zu realisieren als mit von Neumanns gigantischem und extrem langsamem Apparat?

Einfache Automaten mit Erbgut

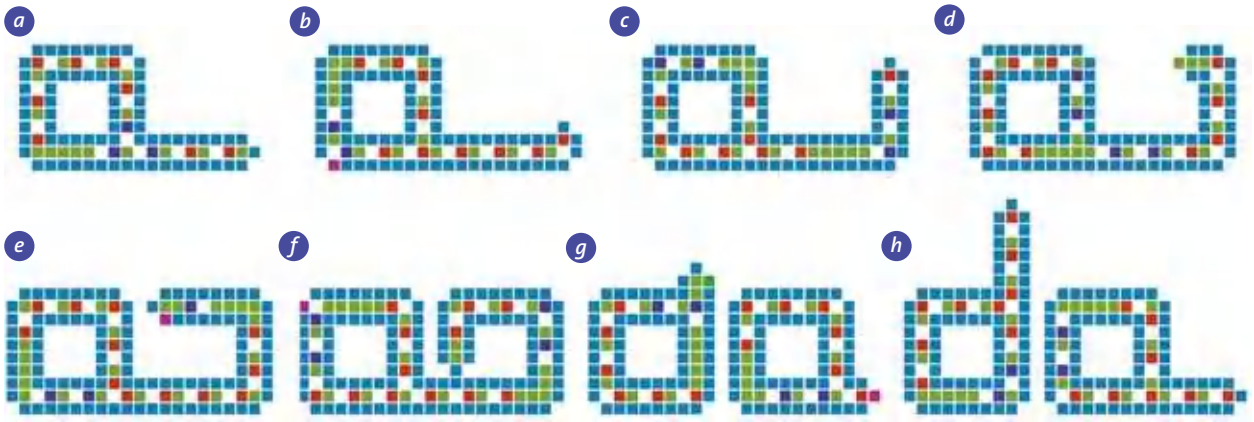
Ja! Die Entdeckung geht auf das Jahr 1984 zurück und ist Christopher Langton zu verdanken. Der Informatiker, der auch den Begriff »künstliches Leben« prägte, wurde zuerst bekannt durch seine »Ameisen« (Spektrum der Wissenschaft 8/1995, S. 10, 9/1995, S. 12 und 10/1995, S. 10). Diese virtuellen Tierchen krabbeln über ein unendliches Schachbrett und verändern in Abhängigkeit von ihrem eigenen Zustand den Zustand des Felds, auf dem sie gerade stehen. Das Konzept des zellulären Automaten ist so allgemein, dass es auch die Welt von Langtons Ameisen beschreibt. Es ist kaum ein Zufall, dass sein selbstreplizierender Automat (»Langtons Schleife«) so wirkt, als würde er von einer Ameise betrieben: Nur an einer Stelle der Struktur findet Aktivität statt, und diese Stelle wandert typischerweise von Zelle zu Zelle.

Langtons Schleife besteht anfänglich aus 86 Zellen, angeordnet zu einem Schlauch mit einem »Genom« im Inneren. Aus ihr sprießt ein »Auswuchs«; der wächst in 150 Zeitschritten zu einer zweiten Schleife heran, in deren Innerem sich eine Kopie des Genoms der ersten Schleife befindet. Diese beiden Schleifen erzeugen wieder neue Schleifen, und so weiter. Nach und nach wird die gesamte Ebene mit Kopien der ursprünglichen Schleife bedeckt (Kasten unten).

Erstaunlicherweise gibt es selbst in diesem Modell noch Raum für Vereinfachung. So stellte sich der schützende Schlauch als entbehrlich heraus. Nach weiteren Untersuchungen fanden schließlich James A. Reggia und Hui-Hsien Chou von der University of Maryland 1993 eine selbstreplizierende Konfiguration, die aus nur noch sechs Zellen besteht (Spektrum der Wissenschaft 4/2002, S. 26). Welche von ihnen zählen zum Genom und welche zur Maschine? Diese Frage lässt sich wahrscheinlich nicht sinnvoll beantworten. Es sieht vielmehr so aus, als sei der Automat von Chou und Reggia eine Zwischenstufe in einem allmählichen Übergang vom Automaten Trivial zur Langton-Schleife. Damit wäre unser Versuch gescheitert, durch eine Definition die interes-

Langton-Schleifen

Diese Konfiguration eines zellulären Automaten (*a*) kann man mit etwas Mühe noch als ein inneres Genom mit einer Außenhülle verstehen, vor allem weil eine einmal entstandene Zelle der Hülle sich im weiteren Verlauf nicht mehr verändert. Im Prinzip bekommt ein schleifenförmiger »Körper« einen Auswuchs, der sich selbst zur Schleife krümmt (*b* bis *f*) und vom »Mutterkörper« abschnürt. Beide Schleifen vermehren sich sodann unabhängig voneinander weiter (*g*, *h*).



santen von den uninteressanten Formen der Selbstreplikation abzugrenzen.

Aber diesem unbefriedigenden Zustand lässt sich abhelfen. Wir haben bislang etwas missachtet, das in von Neumanns Augen wesentlich war: Das genetische System sollte nicht nur Kopien seiner selbst erzeugen können, sondern durch Veränderung seines Genoms auch andere Strukturen, die ihrerseits wieder zur Selbstreplikation fähig sind oder auch nicht. Das läuft darauf hinaus, ein wesentliches Element der biologischen Evolution in die künstliche Welt einzuführen, nämlich die Mutation. Wie kann das gelingen?

Auch dafür hat von Neumann schon die Grundidee geliefert. Er nannte seine fiktive Maschine »Universal Constructor«. Gemeint war eine Konfiguration in einem zellulären Automaten, die nicht nur sich selbst herstellen kann, sondern jede beliebige Konfiguration aus einer sehr großen Klasse. Und zwar gibt es zu jeder geforderten Konfiguration *C* ein Genom *G*, so dass der Universal Constructor *C* produziert, wenn er *G* abliest. Von Neumanns unförmige Maschine kommt dieser Idee zumindest nahe, während Langtons Schleifen zu solch universellen Leistungen nicht im Entferntesten fähig sind.

Unverkennbar hat von Neumann hier seine Ideen aus der Theorie der Computer auf die Welt der konstruierbaren Gegenstände übertragen – auch wenn diese Welt eigentlich wieder nur im Rechner existiert. Es gibt eine große Klasse von Aufgaben, die »berechenbaren Funktionen«, die eine Maschine im Prinzip lösen könnte. Ein Computer heißt universell, wenn er alle berechenbaren Funktionen berechnen kann. Der primitivste aller denkbaren Computer, die Turing-Maschine, die aus nichts als einem Magnetband und einem daran entlangwandernden Schreib-/Lesekopf mit etlichen inneren Zuständen besteht, ist bereits universell. Es ist kein Problem, eine Langton-Ameise zu definieren, die als Turing-Maschine arbeitet; und da man jede Langton-Ameise als einen speziellen zellulären Automaten definieren kann, gibt es zelluläre Automaten, die zugleich universelle Computer sind. Umgekehrt muss ein universeller Computer in Gestalt eines zellulären Automaten nicht unbedingt aus einer Langton-Ameise hergeleitet sein; selbst Conways »Game of Life« (Kasten S. 85) kann mit einer Anfangskonfiguration versehen werden, so dass er diese Eigenschaft besitzt.

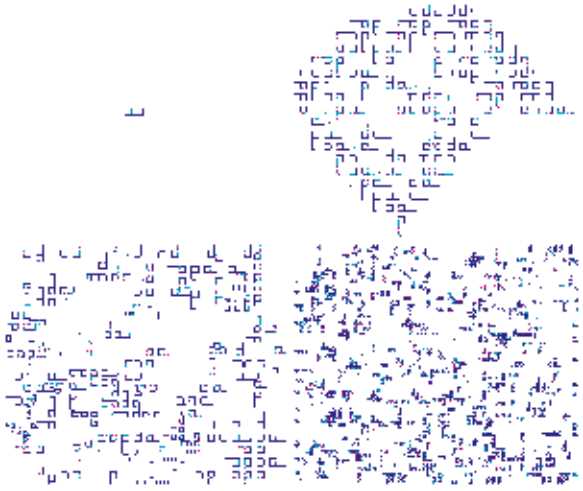
Sex im zellulären Automaten

Für von Neumann war also ein »universeller Konstrukteur« ein naheliegendes Analogon zum universellen Computer. Für ein System, das der Selbstreproduktion nach dem biologischen Vorbild fähig sein soll, wäre diese Fähigkeit allerdings zu viel verlangt. Lebende Organismen können nicht aus einem geeigneten Genom jeden beliebigen materiellen Gegenstand entstehen lassen – und haben das zum Leben auch gar nicht nötig. Für einen »lebensnahen« zellulären Automaten muss man ein vernünftiges Ausmaß an Konstruktionsfähigkeit fordern, aber keine Universalität und schon gar nicht die Fähigkeiten eines universellen Computers. Auch von Neumanns riesige Maschine war noch nicht in seinem Sinn universell.

Damit scheinen wir bei einem zufrieden stellenden Begriff von lebensähnlicher Selbstreplikation angelangt. Er ist allerdings weniger scharf definiert, als man hoffen könnte, weil das Ausmaß der geforderten Konstruktionsfähigkeit nur ungenau bestimmt ist.

Dass es von Neumann gelang, im Reich der zellulären Automaten ein lebensähnliches System mit der Fähigkeit zur Mutation auszuarbeiten, beweist, dass die Selbstreproduktion, die man in der Welt des Lebens beobachtet, kein »Wunder« ist (siehe das Zitat zu Beginn des Artikels). Der Nachweis, dass sein Modell des Lebens als materielle Grundlage nichts weiter braucht als eine diskrete, relativ einfache Physik, ist ein großer Fortschritt.

Evolution der Schleifen



Langtons Schleifen können außer Kopien ihrer selbst keine anderen Objekte erzeugen, geschweige denn solche, die sich ebenfalls selbst reproduzieren. Das gelingt mit verallgemeinerten Schleifen, deren Genom veränderlich ist.

Die Schleife »Evoloop« von Hiroki Sayama bringt Nachkommen von unterschiedlicher Art und Größe hervor, die auch noch miteinander konkurrieren. Wer eine einzige Evoloop-Schleife im Raum des zellulären Automaten aussetzt, kann in der Folge eine Evolution im darwinschen Sinn beobachten! Zunächst vervielfältigen sich die Schleifen so gut wie unverändert. Wird es dann den Nachkommen zu eng, so entstehen durch Kollisionen zwischen den Schleifen Mutationen der Genome, und neuartige Schleifen treten auf. Manche von ihnen sind nicht lebensfähig und verschwinden nach kurzer Zeit wieder.

Im Kampf ums Überleben auf engem Raum setzen sich auf die Dauer die kleinen, robusteren Schleifen durch. Die Bilder zeigen vier Momentaufnahmen dieser Dynamik.

Langtons Schleifen sind zwar für von Neumanns Zwecke zu klein und zu unflexibel; gleichwohl haben sie einige Forscher zu Verallgemeinerungen inspiriert, die auf einfachere Versionen der Von-Neumann-Maschine hinauslaufen. So sind die Schleifen, die Gianluca Tempesti 1995 an der École polytechnique fédérale in Lausanne erfand, mit 148 statt 86 Zellen nur geringfügig komplizierter als die von Langton, können aber recht allgemeine Konstruktionen ausführen. Andere Modelle, wie der Evoloop von Hiroki Sayama, erzeugen eine ganze Familie selbstreproduzierender Schleifen unterschiedlicher Größe und Form, die einander auch noch den Platz streitig machen, mutieren, Erbgut aus verschiedenen Quellen zusammenführen (»Sex«) und damit dem darwinschen Kampf ums Dasein schon recht nahekommen (Kasten links). Das hätte von Neumann zweifellos gefallen.

Galilei und Newton haben gezeigt, dass die Planeten nicht Gottes ständiger Zuwendung bedürfen, um auf ihren Bahnen zu bleiben; es genügt, wenn sie den physikalischen Gesetzen folgen. Entsprechend hat von Neumann bewiesen, dass das Leben zu seiner Aufrechterhaltung kein immer währendes Wunder braucht. Das genetische Schema »Maschine plus Band« zusammen mit der Möglichkeit der Mutation genügt. Damit widerlegt von Neumanns Arbeit definitiv das vitalistische Argument, das Leben sei zu komplex, um sich auf die Physik reduzieren zu lassen. ~

DER AUTOR

Université de Lille und forscht am Laboratoire d'Informatique Fondamentale de Lille (UFL).

QUELLEN

von Neumann, J.: Theory of Self-Reproducing Automata. University of Illinois Press, Urbana 1966
Pesavento, U.: An Implementation of von Neumann's Self-Reproducing Machine. In: Artificial Life 2, S. 337–354, 1995
Reggia, J. A. et al.: Simple Systems that Exhibit Self-Directed Replication. In: Science 259, S. 1282–1287, 1993

WEBLINKS

http://golly.sourceforge.net
Website mit Programmen für sehr viele zelluläre Automaten und Startkonfigurationen, lauffähig auf Windows und Mac

http://psoup.math.wisc.edu/mcell/
Mirek Wojtowicz: 1D and 2D Cellular Automata explorer. Sammlung zellulärer Automaten, mit kostenlosem Programm Mcell

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1146816**

Mark Laita
WasserFarben
Schönheit aus dem Meer
Aus dem Englischen von Ursula Bischoff.
terra magica, München 2011. 200 S., € 49,99

MEERESBIOLOGIE

Ohne Worte

Kein Beiwerk stört die optische Wirkung der eindrucksvoll fotografierten Meeresbewohner.

»WasserFarben« ist nicht mit »Wasserfarben« zu verwechseln! Denken Sie nicht an blasse Aquarelle. Knallbunt sind die vielen Fische und die wenigen Quallen und Kraken, die der amerikanische Fotograf Mark Laita eindrucksvoll ins Bild gesetzt hat. Der Verlag hat mit prachtvoll glänzendem Farbdruck und sattschwarzem Hintergrund das seinige dazugetan. Noch nicht einmal Seitenzahlen stören das ästhetische Empfinden des Betrachters; die nötigsten Informationen stehen auf Erläuterungsseiten am Ende des Buchs.

Mit ihrer spektakulären Schönheit können die Meerestiere Artgenossen nie beeindrucken. Die meisten leben in Tiefen, in die nur noch die Blauanteile des Tageslichts vordringen. Laita hat sie deswegen eigens zum Fototermin in sein salzwasserhaltiges Studio gesetzt – so geräumig, dass immerhin ein Pazifischer Riesenkrake mit einer Armspanne von viereinhalb Metern hineinpasst. Da ist die Wasseroberfläche nicht weit, und der Fotograf bezieht die Spiegelung an derselben als künstlerisches Element gern mit ein – häufig reizvoll, gelegentlich verwirrend und insgesamt etwas zu oft.

Nur den Walhai und den Tiefsee-Anglerfisch hat er – aus nachvollziehbaren Gründen – lieber in ihrem natürlichen Lebensraum aufgesucht: Für den 20 Meter langen Walhai wäre es doch etwas eng geworden, und der immense Wasserdruck der Tiefsee ist im Fotostudio schlechterdings nicht realisierbar.

Einzelporträts liegen Laita sichtlich mehr als Gruppenaufnahmen. Sorgfältig für das Lehrbuch von der Seite abgelichtete Fische sind in diesem Buch die Ausnahme. Dafür ist die elegante, tänzelnde Bewegung, in der Laita seine Models eingefangen hat, beeindruckend und einmalig.

Alice Krüßmann
Die Rezensentin leitet die Bildredaktion von »Spektrum der Wissenschaft«.

Der Großen Netzmuräne *Gymnothorax favagineus* mit dem eleganten Hüftschwung sieht man nicht an, dass sie bis zu drei Meter lang wird.

Der gewöhnliche Krake *Octopus vulgaris* ist in allen Weltmeeren verbreitet.

MARK LAITA, ABDRUCK MIT FRDL. GEN. DER BUCHVERLAGE LANGENMÜLLER

Roger Penrose
Zyklen der Zeit
Eine neue ungewöhnliche Sicht des Universums
Aus dem Englischen von Thomas Filk.
Spektrum Akademischer Verlag,
Heidelberg 2011. 350 S., € 29,95

KOSMOLOGIE

Spekulationen über den Urknall

Roger Penrose entwirft ein überaus gewagtes Weltmodell.

Wie wir heute wissen, fliegt das Universum mit steigender Geschwindigkeit auseinander. Wenn wir die kosmische Expansion zeitlich umkehren wie einen rückwärtslaufenden Film, landen wir bei einem ungeheuer heißen, dichten Anfangspunkt, dem Urknall. Über die Singularität, mit der Raum, Zeit, Strahlung und Materie ihren Anfang nahmen, wissen wir nichts.

Dennoch reizt es Kosmologen, über die Art des Anfangs zu spekulieren. Vielleicht ist unser Universum nur eines unter vielen Paralleluniversen, die unentwegt aus Quantenfluktuationen des Vakuums entstehen? Vielleicht gab es vor dem Urknall ein Vorgängeruniversum, das an seinem Ende zu einem singulären Punkt kollabierte, aus dem unser All hervorging?

Solche Spekulationen bereichert Roger Penrose um eine neue, eigenwillige Version. Der englische Mathematiker und Physiker ist eine Autorität auf dem Gebiet der allgemeinen Relativitätstheorie; zusammen mit seinem Kollegen Stephen Hawking hat er in den 1960er Jahren theoretisch bewiesen, dass es in der Raumzeit Singularitäten geben muss. Wie man heute weiß, lauern solche Risse im Raumzeit-Kontinuum zum Beispiel als supermassereiche Schwarze Löcher im Zentrum von Galaxien und machen sich gelegentlich als Quasare bemerkbar – die energiereichsten Strahlungsausbrüche überhaupt. Was eine solche Koryphäe über die Singularität am Anfang unseres Universums zu sagen hat, verdient gewiss Aufmerksamkeit.

Penrose beginnt seine Überlegung mit einem Problem, das der Urknall aufwirft. Nach dem Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik strebt die Entropie eines Systems zu immer höheren Werten. Die Entropie ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit eines Zustands, und die hängt wiederum mit der Unordnung des Systems zusammen. Penrose zitiert das Beispiel vom rohen Ei, das vom Tisch rollt und auf dem Teppich zerbricht. Der Vorgang erhöht die Entropie des Eis, das als unordentliche Masse auf dem Teppich liegen bleibt; der umgekehrte Prozess – der Teppich wird von selbst wieder sauber, das geplatzte Ei setzt sich zusammen und landet auf der Tischkante – ist zwar mikrophysikalisch nicht unmöglich, da die Bewegungen aller einzelnen Eipartikel zeitlich umkehrbar sind, aber extrem unwahrscheinlich. Diese Vorzugsrichtung der zeitlichen Entwicklung drückt der Satz von der zunehmenden Entropie aus.

Das Problem ist nun: Wenn die Entropie seit Anbeginn der Welt immer nur zugenommen hat, muss sie beim Urknall winzig gewesen sein. Aber wieso soll jener heiße, dichte Ausgangspunkt, der Augenblick einer gigantischen Explosion, ausgerechnet ein Höchstmaß an Ordnung und Unwahrscheinlichkeit besessen haben? Das schreit geradezu nach einer Vorgeschichte, die uns erklärt, wodurch die Entropie des Universums beim Urknall quasi auf null gestellt wurde.

Wie Penrose dieses Problem im ersten Teil seines Buchs erläutert, das macht ihm keiner nach. Er nimmt den Leser mit in abstrakte Phasenräume, die er mit virtuos gezeichneten Skizzen veranschaulicht. Wie in seinen früheren halb populärwissenschaftlichen Büchern – beginnend mit »The Emperor's New Mind«, das ich seinerzeit ins Deutsche übersetzt habe – erweist er sich als souveräner Erzähler von Geschichten aus der Welt der mathematischen Physik. Man ist gespannt auf den Ausgang: Wie wird Penrose das kosmologische Entropieproblem lösen?

Um es gleich zu sagen: Er verlässt die Physik und hebt in pure Geometrie ab. Ziemlich kurz angebunden – was sonst gar nicht seine Art ist – führt Penrose geometrische Transformationen ein, die er bescheiden »konforme Abbildungen zwischen Minkowski-Räumen« nennt. In der Fachwelt sind sie als Penrose-Diagramme bekannt. Experten der Gravitationstheorie dürften sie so anschaulich finden wie ein Teilchenphysiker die Feynman-Diagramme, aber dem gewöhnlichen Leser gibt Penrose keine Erklärung, sondern nur Hieroglyphen.

Diese konformen Abbildungen müssen nun die gesamte Beweislast des von Penrose vorgeschlagenen Modells tragen. Penrose-Diagramme zeichnen sich dadurch aus, dass beim Wegtransformieren der Unendlichkeiten mittels dieser Abbildungen nur die Lichtkegel, das heißt die Raumzeitlinien der Photonen, ihre Form behalten. Also nimmt Penrose einfach an, dass mit der Zeit die gesamte Materie des Universums in Schwarzen Löchern verschwindet, bis nur noch Photonen übrig sind – und dann macht eine konforme Transformation aus dem müden alten Universum schwuppdiwupp ein funkelnagelneues, das mit einem rein geometrisch herbeigezauberten – oder zumindest ermöglichten – Urknall beginnt.

Und wieso verschwindet dabei die hohe Entropie des alten Universums? Da wird Penrose ganz vage. Er behauptet, die alles verschlingenden Schwarzen Löcher würden als eine Art Entropiestaubsauger wirken. Das ist aber doppelt unglaubwürdig. Was nach Stephen Hawkings früherer Meinung – die dieser im Unterschied zu Penrose un-

terdessen revidiert hat – in Schwarzen Löchern auf Nimmerwiedersehen verschwindet, ist nicht Entropie, sondern Information. Letztere ist aber gewissermaßen das Gegenteil von Entropie. Wenn Information, das heißt geordnete Struktur, im Schwarzen Loch verschwindet, nimmt die Unordnung des restlichen Universums zu: Die Entropie wächst! Ganz zu schweigen davon, dass die allermeisten Physiker, Hawking inklusive, heute der Überzeugung sind, dass Schwarze Löcher die geschluckte Information mit der so genannten Hawking-Strahlung wieder komplett auswerfen.

So oder so: Die Schwarzen Löcher lösen das von Penrose aufgeworfene Rätsel der kosmologischen Entropie nicht. Der von der Exposition des Problems faszinierte Leser fühlt sich frustriert.

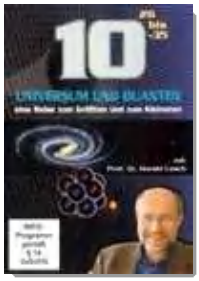
Unabhängig davon muss jedes kosmologische Modell, und sei es noch so spekulativ, irgendeine empirisch prüfbare Aussage machen. Das versucht auch Penrose. Er vermutet, in der kosmischen Hintergrundstrahlung müsste es charakteristische Spuren der letzten Phase vor dem Urknall geben, und zwar in Form großer Kreisbögen, die sich als winzige Abweichungen vom Strahlungshintergrund am Himmel abzeichnen sollen. Es wurde im vergangenen Jahr sogar gelegentlich behauptet, man habe solche Spuren entdeckt. Die meisten Kosmologen bezweifeln aber, dass dahinter mehr steckt als Zufallsrauschen.

Alles in allem eröffnet das Buch einen interessanten, aber letztlich verwirrenden Blick in hochspezielle Bereiche der kosmologischen Hypothesenbildung. Ab der Mitte ist es nur noch für einen kleinen Kreis von Experten verständlich.

Michael Springer
Der Rezensent ist Physiker und ständiger Mitarbeiter von »Spektrum der Wissenschaft«.

Harald Lesch, Jörn Müller
Sternstunden des Universums
Von tanzenden Planeten und kosmischen Rekorden
C. Bertelsmann, München 2011.
268 S., € 19,99

Harald Lesch
Die Grenzen der physikalischen Erkenntnis
DVD.
Komplett-Media, Grünwald 2009.
64 Minuten, € 14,95



Harald Lesch
10 hoch 26 bis –35
Universum und Quanten – Eine Reise zum Größten und zum Kleinsten
DVD.
Komplett-Media, Grünwald 2010.
85 Minuten, € 22,95

Harald Lesch
Die Ganze Natur
Goethes Naturphilosophie
DVD.
Komplett-Media, Grünwald 2010.
55 Minuten, € 19,99

Wilhelm Vossenkuhl, Harald Lesch
Kant 3.0
Dialog über einen kritischen Geist
DVD.
Komplett-Media, Grünwald 2011.
82 Minuten, € 14,99;
Audio-CD,
79 Minuten, € 12,95

Manfred Spitzer, Harald Lesch, Günther »Gunkl« Pahl
Gott!
Wo steckst Du?
2 CDs.
Galila, Etsdorf am Kamp (Österreich) 2011. € 19,90

PHYSIK UND MEHR

Der Rand des Wahnsinns

Harald Lesch erklärt die Welt – und das macht wirklich Spaß.

Kommunikation wissenschaftlicher Sachverhalte ist schwierig. Umso mehr fallen Mitmenschen auf, denen es gelingt, die oft vertrackten Zusammenhänge auch für Laien nachvollziehbar und spannend darzustellen. Harald Lesch ist jemand, der es neben seiner wissenschaftlichen Arbeit als Astronom an der Universität München wie kaum ein anderer schafft, auch größere Zuhörermengen in den Bann zu schlagen.

Lesch setzt ein an der Absturzkante des gesicherten Wissens, am »Rand des Wahnsinns« (in seinen eigenen Worten) oder auch an den »Grenzen der physikalischen Erkenntnis« (so der marktgängiger formulierte Titel der DVD) – und fühlt sich dort am wohlsten. Denn da verlässt er bekanntes Terrain und begibt sich in das unwegsame Gelände großer – zumeist ungelöster – Fragen und spekulativer, ungeprüfter oder unüberprüfbarer neuer Theorien.

Harald Lesch spricht uns in zahlreichen Fernsehauftritten, im Radio und auf unzähligen DVDs an: direkt, scheinbar alltäglich und umgänglich. Und als Angesprochener lässt man sich die unglaublichen und oft jede Vorstellung sprengenden Ideen der modernen Physik und Kosmologie gerne gefallen, sogar seine wohlplatzierten Flap-

sigkeiten, die bei einem schlechteren Präsentator nur nerven würden. Wie er in Jeans und T-Shirt vor einer Schultafel steht, im lockeren Alltagston die schwierigsten Konzepte umreißt und – anachronistischer geht es gar nicht – mit Kreide einige Begriffe aufschreibt, das verführt auch solche, die bei Mathematik, Physik oder Astronomie eher an ihre schulischen Albträume erinnert werden.

Auf der DVD »Die Grenzen der physikalischen Erkenntnis« berichtet Lesch launig über die Grundlagen des physikalischen Weltbilds, also Quantenphysik, spezielle sowie allgemeine Relativitätstheorie – ein vergnüglicher Parcours durch schwieriges Gelände. Das gilt auch für die zahlreichen weiteren Videos von Lesch. Und bei allem Vergnügen sind es Vorlesungen von großem Nährwert für interessierte Laien, jeden Schüler oder Studenten, sei es die DVD über kosmische Dimensionen (»Universum und Quanten«) oder die über Gravitationswellen (»Kepler und die Folgen«, oben nicht aufgeführt), bei der Lesch seine Darstellung gemeinsam mit den Astrophysikern Hanns Ruder und Karsten Danzmann in eine Tanztheatervorführung einbettet.

Es ist kein Wunder, dass Lesch als öffentliche Figur auch der Versuchung erliegt, buchstäblich über Gott und die Welt zu parlieren, so über Goethes Naturphilosophie (»Die Ganze Natur«) und über Philosophie allgemein (»Kant 3.0«) – auf der letztgenannten DVD im Gespräch mit dem Philosophen Wilhelm Vossenkuhl. Da geht es naturgemäß um die berühmten letzten Fragen: Was kann ich wissen? Was soll ich tun? Was darf ich hoffen? Oder zuletzt im Gespräch mit dem Hirnforscher Manfred Spitzer und dem Kabarettisten »Gunkl« ganz persönlich über Religion und Naturwissenschaft. Solches Crossover geht oft schief – aber nicht bei Harald Lesch. Ich kann jedem, der sich gerade für die Beziehung von Religion und Wissenschaft interessiert, diese Dokumente nur empfehlen.

Wer gut sprechen kann, ist nicht notwendig auch ein guter Buchautor. Aber zusammen mit dem Astronomen Jörn Müller gelingt es Lesch in den »Sternstunden des Universums«, den lockeren Ton und die Anschaulichkeit seiner Vorlesungen in ein Buch zu übertragen. Auch hier blickt er über den Tellerrand der Naturwissenschaft hinaus und stellt – nach einem Rundumschlag von Kernenergie, Astronomie, Kosmologie bis zur Stringtheorie – die Grundsatzfragen: Warum gibt es überhaupt etwas und nicht nichts? Gibt es einen letzten Sinn? Gibt es Gott? In seinem Radiogespräch über Religion und Wissenschaft stellt Lesch fest: »Es ist der Zweifel, der uns alle verbindet.« Daher sollten aus seiner Sicht alle den fundamentalistischen Atheisten dankbar sein, weil diese es seien, die am heftigsten über Gott nachgedacht hätten.

Reinhard Breuer
Der Rezensent ist Editor-at-Large bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Bernulf Kanitscheider
Das hedonistische Manifest
Hirzel, Stuttgart 2011. 304 S., € 24,–

PHILOSOPHIE

Lustvolle Ethik

Lebe so, dass du möglichst viele angenehme Erlebnisse hast. Diese ungeheuer attraktive Maxime erweist sich bei näherer Betrachtung als ergänzungsbedürftig.

Mein sechsjähriger Sohn Max pflegt sich den Mund bis zur Kapazitätsgrenze vollzustopfen – und manchmal darüber hinaus –, wenn es etwas Leckeres wie zum Beispiel ein fettes Hühnerbein gibt, und verzehrt mit Genuss die Produkte seiner Nase.

Wir werden ihm so etwas abgewöhnen müssen, aber das fällt nicht leicht. Erstens ist es eine Wonne anzusehen, wie der Junge seinen Spaß hat. Zweitens steht das Argument, er störe das Empfinden anderer, auf wackligen Beinen: Die brauchen ja nicht hinzuschauen. Und drittens hat Max einen echten Philosophen auf seiner Seite. Der emeritierte Wissenschaftstheoretiker Bernulf Kanitscheider argumentiert auf 300 Seiten für den Hedonismus, die Ethik, welche die eigene Lust zum höchsten Ziel allen Handelns erhebt.

Die Idee ist nicht grundsätzlich neu. Unter den Griechen der Antike war sie durchaus verbreitet, am klarsten ausgedrückt nicht etwa von dem sprichwörtlichen Epikur, dem es eher um die Seelenruhe als die Lust an sich ging, sondern von seinem Kollegen Aristipp von Kyrene. Heute aber gilt sie als anrüchig oder zumindest minderwertig.

Der Standardphilosoph pflegt statt der Lust die Tugend zum höchsten Lebensziel zu erklären, oder wenigstens die Vervollkommnung des menschlichen Verstands. Und da es ihm um ewige, von jeder Beobachtung unabhängige Wahrheiten geht, muss ihm der Hedonismus schon deswegen suspekt sein, weil dieser sich auf eine empirische Beobachtung stützt: dass alle Menschen nach angenehmen Empfindungen streben und unangenehme zu vermeiden trachten.

Na ja: Ich kann damit leben, dass die Hedonisten bei der Beantwortung der

Werner Kinnebrock

Was macht die Zeit, wenn sie vergeht? Wie die Wissenschaft die Zeit erklärt

C.H.Beck, München 2012. 160 S., € 12,95

Der Autor (»Bedeutende Theorien des 20. Jahrhunderts«) und ehemalige Reaktormathematiker Werner Kinnebrock hat sich einer dieser besonders nervigen Kinderfragen zugewandt, die leicht zu stellen, aber nur sehr schwer zu beantworten sind. Erfrischend bekennt er gleich zu Beginn: »Im Grunde weiß niemand, was ›Zeit‹ ist.« Über die »Zeitsparkasse« aus Michael Endes »Momo« und Goethes Klagen über die »veloziferische« Hektik seiner Zeit kommt er zu den klassischen Fragen: ob die Zeit rückwärts- oder langsamer laufen kann, wie man sie überhaupt misst, ob Zeitreisen möglich sind und wie es der Zeit in der Quantenphysik ergeht. Der Reigen endet mit Gedanken zu biologischen Uhren und Nahtoderlebnissen. Dank sparsamer Verwendung von Formeln und Tabellen und netten, kleinen Exkursen eine angenehme, einfache Lektüre für den Sonntagnachmittag. REINHARD BREUER

Bernd Harder

Sie sind mitten unter uns. Die Wahrheit über Vampire, Zombies und Werwölfe

Herder, Freiburg 2012. 200 S., € 14,99

Gar Schauerliches weiß der Autor zu berichten, aus Augenzeugenberichten wie auch aus Literatur und Film: von Gestaltwandlern, Untoten und Bluttrinkern, auch vom Ziegensauger Chupacabra, von Yeti und Big Foot. So mancher Geschichte nimmt er ihren Schrecken durch wissenschaftliche Erklärungen: warum Leichen mitunter nicht verwesen, Zombies eine Domäne Haitis zu sein scheinen und man die Jugend-Vampyr-Szene nicht fürchten muss. Gleichwohl lässt Bernd Harder viel Platz fürs Gruseln. Insbesondere in Sachen Werwölfe und Artverwandte fällt ihm wenig mehr ein als der Hinweis, die Fantasie des Menschen könne ihm im Dunkel der Nacht einen Streich spielen. Gibt es sie also wirklich? Eine Antwort bleibt uns der Autor schuldig. Eine hübsche Sammlung von Gruselgeschichten – aber ausgerechnet vom Chefreporter des Magazins »Skeptiker« würde man doch noch etwas mehr wissenschaftliche Vertiefung erwarten. KLAUS-DIETER LINSMEIER

Alain Hertz

Der Graf der Graphen. Kriminalistische Verwicklungen mit mathematischer Pointe

Aus dem Französischen von Micaela Krieger-Hauwede und Ines Laue.

Vieweg + Teubner, Wiesbaden 2011. 192 S., € 29,95

Ein Kriminalist weiß nur, wer unter den sieben Verdächtigen welchem anderen innerhalb des gesicherten Bereichs begegnet ist, aus dem wichtige Beweisstücke gestohlen wurden. Allein daraus ermittelt er den Täter – am grünen Tisch, indem er sein Wissen in eine Gestalt aus Punkten und diese verbindenden Kanten bringt: einen Graphen. Ja, dieses mathematische Hilfsmittel kann die vielfältigsten realen Situationen auf einen abstrakten Kern reduzieren und dadurch handhabbar machen. Alain Hertz, Mathematikprofessor aus Montreal, führt uns mit neun Geschichten auf ebenso viele schöne Ergebnisse der Graphentheorie. Aber erwarten Sie keinen Krimi! Die Einkleidung in Kriminalfälle ist fadenscheinig bis nicht vorhanden, und der betuliche Schreibstil lässt Spannung gar nicht erst aufkommen. Ein Buch zum kultivierten Genießen im Lehnstuhl. CHRISTOPH PÖPPE

Steven Jay Schneider (Hg.)

101 Science-Fiction-Filme – die Sie sehen sollten, bevor das Leben vorbei ist

Aus dem Englischen von Stefanie Kuballa-Cottone. Olms, Zürich 2012. 416 S., € 9,99

Nach Action-, Kult-, Horror- und anderen Filmen ist das aktuelle Thema in der »101er Reihe« jetzt die Sciencefiction. 33 renommierte Filmkritiker haben in jeweils zwei (kleinformatigen) Seiten pro Film eine Inhaltsangabe, eine Einordnung in die Geschichte des Mediums, etliche Zusatzinformationen und ein charakteristisches Zitat untergebracht. Die interessanten und unterhaltsamen Texte beweisen, dass die Autoren ihr Handwerk verstehen. Hinzu kommen je ein ganzseitiges Filmplakat und Szenenfoto. Die Auswahl – von »Die Reise zum Mond« (1902) über »Lautlos im Weltraum« (1972) und »Blade Runner« (1982) bis zu »I, Robot« (2004) und »Children of Men« (2006) – ist durchaus überzeugend. Die Zeit nach 2006 ist in dem Buch nicht vertreten; aber davon abgesehen liefert es eine informative und kurzweilige Übersicht zu günstigem Preis. ELKE REINECKE

Philosophenfrage »Was soll ich tun?« auf die letzte Klärung der Frage »Was kann ich wissen?« verzichten. Immerhin gibt es kaum eine Beobachtung über Menschen, die besser belegt ist als diese.

Kanitscheider hat auch gegen die Vervollkommnung des menschlichen Verstands nichts einzuwenden, ganz im Gegenteil. Aber er stuft sie nicht als Ziel menschlichen Strebens ein, sondern als Mittel – für ein angenehmes Leben natürlich. Schon für dessen Finanzierung ist es hilfreich, wenn man seinen Verstand Gewinn bringend einsetzen kann; Bildung verhilft einem auch zu Freuden, die dem Hedonisten, der sich mit dem Vergnügen von Bier und Chips vorm Fernseher zufriedengibt, verschlossen bleiben; und vor allem bedarf die größte Quelle der Lust, die Sexualität, der bewussten Kontrolle. Insofern gesteht Kanitscheider dem Verstand durchaus eine bestimmende Rolle zu. Nur zu sorgfältig kontrollierten Gelegenheiten darf er sie vorübergehend abgeben; denn der Hedonist möchte sich die Lusterlebnisse, bei denen es darauf ankommt, dass man den Verstand verliert, nicht prinzipiell versagen.

Auch gegen ein tugendhaftes Leben hat Kanitscheider keine grundsätzlichen Einwände. Er verwendet allerdings wesentliche Teile seines Buchs darauf, über die sauertöpfischen, lustfeindlichen und pflichtbetonten Kollegen herzuziehen, die über die Jahrhunderte gesehen die erdrückende Mehrheit in seiner Zunft ausmachen. Zu allem Überfluss eigne sich Pflichtethik zur Begründung von Staatstreue und militärischem Gehorsam, während einem Genussmenschen die Begeisterung für kriegerische Abenteuer prinzipiell fremd sei.

Letzteres ist empirisch allerdings ausgesprochen schlecht begründet. Die Franzosen, kultivierte Genießer par excellence, und die Amerikaner, die den Hedonismus (»pursuit of happiness«) sogar an prominenter Stelle in ihre Unabhängigkeitserklärung geschrieben haben, waren nicht weniger kriegerisch als die pflichtgesteuerten Preußen.

Nicht neu, aber köstlich zu lesen ist Kanitscheiders Polemik gegen die Leute, die ihren Mitmenschen ausgerechnet das Vergnügen aufs Strengste reglementieren, über das sie selbst sich von Berufs wegen im Stand der Unkenntnis zu befinden haben: die Kleriker. Das waren noch Zeiten, als die Päpste sich die notwendige Sachkenntnis mit Hilfe ihrer Kurtisanen aneignen konnten! Welch Ironie der Geschichte, dass just Martin Luther, der Mensch, der für die »Freiheit eines Christenmenschen« kämpfte, sie nötigte, sich wieder streng an die lustfeindlichen Vorgaben der Kirchenväter zu halten.

Es ist allerdings nicht unproblematisch, dass Kanitscheider der Tugend eine untergeordnete Rolle zuweist. Der kluge Hedonist »strebt … das Wohlwollen und die Freundschaft mit allen Mitmenschen an, aber nicht, weil es für

diese Tugenden irgendeine metaphysische Begründung gäbe, sondern weil rein pragmatisch das Leben in einer wohlwollenden Umgebung am angenehmsten ist.« Nur seine unklugen Gesinnungsgenossen, die nicht begriffen haben, dass eine mit unlauteren Mitteln erlangte Annehmlichkeit auf die Dauer nicht so angenehm ist, muss man durch Vorschriften daran hindern, anderen Schaden zuzufügen.

Ganz so krass hält der Autor die Abwertung der Tugend zu einer abgeleiteten Größe dann doch nicht aufrecht. Der Hedonist, den er sich vorstellt, würde sich sein Vergnügen auch dann nicht auf unehrliche Weise verschaffen, wenn er sicher sein kann, nicht dabei erwischt zu werden. Aber richtig treffende Argumente gegen ein solches Verhalten führt Kanitscheider nicht an.

Selbst gegen die grausamen Mittel, mit denen die Romanfiguren des Marquis de Sade sich ihr Vergnügen verschaffen, hat er nur etwas sehr Abstraktes vorzubringen: De Sade verkennt, dass eine Einteilung der Menschen in Höher- und Minderwertige, sprich Quäler und Quälbare, nach allem, was die Wissenschaft dazu beizutragen hat, nicht begründbar ist. Demnach müsste jeder, der das Misshandeln befürwortet, damit rechnen, sich in der Rolle des Misshandelten oder gar Getöteten wiederzufinden, was hedonistischen Zielen zweifellos abträglich ist.

Aber der Irrglaube, es gebe höher- und minderwertige Menschen, ist weit verbreitet. Selbst der von Kanitscheider gepriesene Epikur hing ihm an, denn er hielt sich Sklaven, wie damals allgemein üblich. Ein Hedonist hätte gegenüber den zahlreichen Anhängern dieses Irrglaubens kein Argument gegen sadistische Praktiken – an Untermenschen, versteht sich – in der Hand.

Mehr noch: Tugendhaftes Verhalten ist zwar den Zielen des Hedonismus – meistens – zuträglich, aber der Hedonismus allein reicht nicht aus, das mit der erforderlichen Intensität und Glaubwürdigkeit zu begründen.

Nehmen wir eine ganz gewöhnliche Beziehungssituation. Sophie verhält sich gelegentlich so, dass es für Arne so aussieht, als sei die zukünftige Lustbilanz eines gemeinsamen Lebens mit ihr negativ. Für Arne wäre es dann konsequent, ihr daraufhin den Laufpass zu geben. Für Sophies persönliche Lustbilanz dagegen ist es entscheidend, dass sie genau damit nicht rechnen muss – jedenfalls nicht jedes Mal, wenn sie ihm mit irgendeiner Zickigkeit auf den Geist geht. Nur unter dieser Voraussetzung ist sie zu gewissen Investitionen in die Beziehung bereit; durch diese und nur dadurch rutscht Arnes prognostizierte Lustbilanz ins Positive. Dasselbe gilt mit vertauschten Rollen, und so werden sie glücklich bis an ihr Lebensende.

Mit einer rein hedonistischen Begründung (»Ich bleibe bei dir, weil es schön mit dir ist – und solange das der Fall ist.«) kann das nicht funktionieren. Es funktioniert auch sonst in aller Regel nicht, sagt Kanitscheider und beruft sich dabei auf die empirisch zu beobachtende Natur des Menschen – was ich in diesem Fall für ein schwaches Argument halte.

Es genügt auch nicht, wenn ich gegenüber dem Max argumentiere, dass sich wegen seiner Verhaltensweisen andere Leute von ihm abwenden und ihm deswegen sehr viele lustvolle Erlebnisse entgehen werden. Denn daraus folgt nur, dass er angenehme und unschädliche Tätigkeiten wie das Nasepopeln auf Gelegenheiten beschränken sollte, bei denen niemand zuschaut. Das schafft er nicht, so oft wie er, ohne es zu merken, den Finger in der Nase hat. Besser, er verinnerlicht den Grundsatz, dass so etwas eklig ist.

Eigentlich halte ich mich für einen lustbetonten Menschen. Erst die Lektüre dieses brillant geschriebenen Werks hat mir klargemacht, was für ein Tugendbold ich bin.

Christoph Pöppe
Der Rezensent ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Alastair Fothergill, Keith Scholey (Regie)
Im Reich der Raubkatzen
Walt Disney Studios Motion Pictures Germany, München.
Kinostart: 19. April 2012.
Freigegeben ohne Altersbeschränkung.
89 Minuten

KINOFILM

Der König der echten Löwen

Eine dramatische Geschichte vom Leben und Sterben in der Savanne – so wie das Leben sie erzählt.

A star is born – im Wortsinn. Die überaus attraktive Hauptdarstellerin Mara ist ein neugeborenes Löwenmädchen, und der Film beginnt mit fröhlichen Bildern von Mutterliebe und sorglosem Herumspielen mit den anderen Angehörigen des Rudels – mitten in der beeindruckenden Weite der afrikanischen Savanne.

Disney setzt in diesem neuen Film wieder auf Tierdokumentationen – in schöner, alter Tradition von »Die Wüste lebt«. Den Filmemachern geht es weniger darum, Wissen zu vermitteln, als vielmehr eine Geschichte zu erzählen. Mara wächst zu einer selbstständigen Junglöwin heran, der alte Rudelchef Fang muss seinem Herausforderer Kali und dessen Söhnen weichen, die Gepardenmutter Sita bringt drei ihrer fünf Kinder heil durch die Gefahren ihrer wilden Umwelt. Wie echte Schauspieler werden die Hauptfiguren auf der Website zum Film persönlich vorgestellt

Die Gepardin Sita mit ihren drei überlebenden Kindern schaut sich sichernd um (links). Das Löwenrudel im Anmarsch (oben) nimmt die kleine Mara (Porträtfoto rechts) schützend in die Mitte.

(www.disney.de/disneynature/filme/raubkatzen/#/charaktere).

Eine Stimme aus dem Off begleitet ihr Schicksal. Das bringt Informationen wie auch manche Emotion wesentlich besser zum Zuschauer als die Worte, die in »Die Reise der Pinguine« (Spektrum der Wissenschaft 10/2005, S. 98) den tierischen Darstellern in den Mund gelegt wurden. Dieses Stilmittel lief auf eine weit übertriebene Vermenschlichung hinaus und gab Anlass zu allerlei Diskussionen. Im »Reich der Raubkatzen« fühlt der Zuschauer auch ohne sprechende Tiere heftig mit, wenn sich die Löwin Layla zum Sterben zurückzieht, nachdem sie davon überzeugt ist, ihre Tochter Mara sicher im Schutz des Rudels zurücklassen zu können. Oder wenn die Gepardin Sita ihre Jungen gegen Hyänen verteidigt – und doch zwei von ihnen verliert. Stellenweise hätte auch der deutsche Sprecher Thomas Fritsch etwas weniger Theatralik in seine Stimme legen können.

Die Bilder sind fantastisch! Bewundernswert, wie die Kameraleute es geschafft haben, die jagende Gepardin in freier Wildbahn in Zeitlupe so aufzunehmen, dass man jede Bewegung der Muskeln sieht. Die Verantwortlichen haben gut daran getan, auf absolute Profis zurückzugreifen: Der Regisseur Alastair Fothergill war schon erfolgreich mit »Unser blauer Planet« und »Planet Erde«, zwei Dokumentarserien der BBC, die Maßstäbe setzten und aus deren Material die Kinofilme »Deep Blue« und »Unsere Erde« entstanden. Sein Kollege Keith Scholey, zuständig für Produktion, Drehbuch und Regie, ist promovierter Zoologe und hat als Chefredakteur der BBC-Naturkunderedaktion schon bei »Unser Blauer Planet« mit Fothergill zusammengearbeitet.

Eigentlich wirkt der Film, als hätte er ein Drehbuch gehabt – was natürlich nicht der Fall war. Die Filmcrew hat sich in den Nationalpark Masai Mara in Kenia begeben und dort nach besonderen Ereignissen gesucht – mit spektakulärem Erfolg. »Die Dreharbeiten haben zweieinhalb Jahre in Anspruch genommen, und in der ganzen Zeit gab es vielleicht 20 Tage, an denen etwas Außergewöhnliches passiert ist«, so Scholey.

»Im Reich der Raubkatzen« ist Familienunterhaltung im besten Sinn. Dem »König der Löwen« aus derselben Filmfabrik, der eine ähnliche Geschichte im Zeichentrickformat erzählt, steht er in seiner Eignung für Kinder nicht nach. Und auch wenn der Film nicht zur Wissensvermittlung gedacht ist: Gelernt haben meine Kinder und ich trotzdem noch eine ganze Menge.

Kleiner Tipp: Bleiben Sie noch einen Moment sitzen, wenn der Film zu Ende ist. Die Aufzählung des Personals zum Film ist nicht so todlangweilig wie üblich. Man bedankt sich bei der Giraffe als »crane operator«, beim Warzenschwein für »hair and make-up«, beim afrikanischen Elefanten für »additional memory«, und die »security patrol unit« waren die Nashörner.

Elke Reinecke

Die Rezensentin ist Diplombiologin und Onlineredakteurin bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

Tödliche Arzneien

»Untersuchungen von W. Nyhan haben gezeigt, daß medikamentöse Gaben, die von einem älteren Säugling ohne Schaden vertragen werden, das Neugeborene schwer schädigen, ja sogar seinen Tod herbeiführen können. Das liegt vor allem daran, daß der Körper des Neugeborenen noch nicht die Fähigkeiten besitzt, die verabreichten Medikamente wieder auszuscheiden, so daß er mehr Medikamente in sich aufspeichert als ihm zuträglich ist.« Naturwissenschaftliche Rundschau, Mai 1962, S. 196

NASA-Dependance in Australien

»In der Nähe von Canberra/Australien wird in Kürze das größte Radioteleskop der Welt entstehen. Ein Riesenkreuz, dessen Einzelarme je 1609 m lang und 12 m breit sein werden, bildet das Grundgerüst für ein parabolisch angeordnetes Netzwerk. Das Riesenkreuz soll 1965 fertig werden und einen Empfang aus 30 Milliarden Lichtjahren Entfernung ermöglichen.« *(Das Teleskop ist heute Teil des Deep Space Network der NASA und dient neben astronomischen Zwecken auch zur Kommunikation mit Raumsonden und Satelliten. Während des Apollo-Programms wurde von dort aus die Mondlandefähre überwacht. Die Red.)* Naturwissenschaftliche Rundschau, Mai 1962, S. 201

Lange Schädel in der Eiszeit, kurze in der Jungsteinzeit

Aufstieg der Kurzköpfe

»Der Vergleich von Funden aus aufeinanderfolgenden Zeitabschnitten sagt uns, daß sich im Erscheinungsbild des Menschen ein fortgesetzter Wandel vollzogen hat. Die Ausgangsform des menschlichen Schädels war lang, wenn auch vor allem durch ihre Niedrigkeit und Schmalstirnigkeit von den heutigen Langköpfen verschieden. Brachykephale *(also eher Kurzköpfige. Die Red.)* gibt es erst in einem sehr späten Stadium der menschlichen Stammesgeschichte, zunächst in ganz geringer Zahl, in der Jungsteinzeit allmählich häufiger werdend.« Die Umschau in Wissenschaft und Technik 9, 1962, S. 263–265

1912

Dunkle Sonne, laute Signale

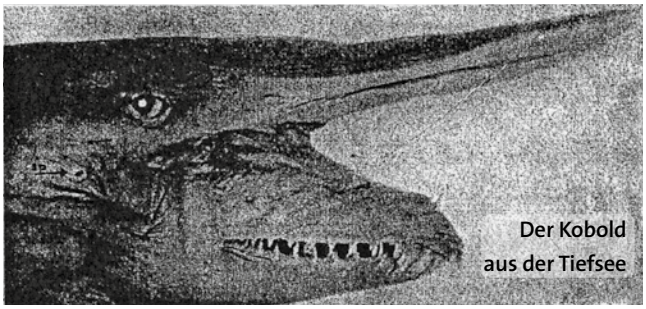
»Die Gesellschaft für drahtlose Telegraphie m.b.H. hat während der Sonnenfinsternis am 17.4. Empfangsversuche in Berlin gemacht. Mit zunehmender Verfinsterung nahmen die Zeichen an Stärke zu und erreichten ihr Maximum im Zeitmoment der größten Sonnenbedeckung. Ganz ähnlich während der Wiederaufhellung der Sonne. Die ganze Beobachtung läßt den Schluß zu, daß die Intensität der Sonnenausstrahlung auf die Ausbreitung der Wellen von viel größerem Einfluß ist, als Temperatur- oder Feuchtigkeitsgrad der Atmosphäre.« Elektrotechnische Zeitschrift, Mai 1912, S. 488–489

Hoch über dem Rummel

»Die höchste bisher gebaute Brücke dürfte die bei Constantine in Algier sein, deren Fahrbahn 174 m über dem Wasserspiegel des Flusses Rummel liegt. Da die Breite der Schlucht für eine gemauerte Brücke zu gross war, entschloss man sich zum Bau einer Hängebrücke nach dem System des französischen Ingenieurs Arnodin.« *(Seit 2009 ist die Siduhe-Brücke in China mit 472 Metern über dem Fluss die höchste Brücke der Welt. Die Red.)* Prometheus 1176, Mai 1912, S. 506–507

Ein Hai mit dem gewissen Etwas

»Besonders ergiebig an Tiefseetieren haben sich der Indische Ozean und die japanischen Gewässer erwiesen. In diesen Gewässern fanden japanische Fischer einen riesigen Tiefseehai, dessen absonderliches Aussehen ihm in seiner Heimat den Namen »Tenguzame«, d. h. Koboldfisch, eintrug. Mitsukurina Owstóni Jordan wird bis zu 4 m lang; er hat die langgestreckte Form und die purpurbraune Farbe, die so viele Tiefseefische auszeichnen. Das Absonderlichste an ihm ist jedoch der Nasenfortsatz (Rostrum), der, von oben nach unten abgeflacht, am Vorderende des Schädels nach vorn ragt. Die stechenden Augen, die sonderbare Nase und das stark vorspringende Maul verleihen zusammen dem Hai ein gespensterhaft häßliches Aussehen.« Kosmos, Mai 1912, S. 156–157



Der Kobold aus der Tiefsee

AUS ZEITSCHRIFTEN DER FORSCHUNGSBIBLIOTHEK FÜR WISSENSCHAFT- UND TECHNIKGESCHICHTE DES DEUTSCHEN MUSEUMS

Der Flammenwagen

DEUTSCHES MUSEUM

Der Raketenwagen RAK 7 von Max Valier ist in der Raumfahrtausstellung des Deutschen Museums in München zu sehen. Bei einer Testfahrt brauchte der Pilot gute Nerven, denn der mit Flüssigtreibstoff angetriebene Motor machte einen Höllenlärm.

Von Jörg Wipplinger und Klaus-Dieter Linsmeier

Am 19. April 1930 verfolgten Journalisten auf dem Berliner Flugplatz Tempelhof die Vorführung des »Valier-Heylandt RAK 7«, eines Automobils, das sie in ihren Berichten passenderweise »Flammenwagen« nannten: Mit infernalischem Lärm fauchte eine fast zwei Meter lange Feuerzunge aus einem Rohr, und das Fahrzeug beschleunigte auf 80 Kilometer pro Stunde. Die Absicht des Erfinders Max Valier war es aber nicht gewesen, das schnellste Auto der Welt zu bauen, sondern einen weiteren Schritt auf dem Weg ins All zu wagen. Es war die erste öffentliche Vorführung eines mit flüssigem Treibstoff angetriebenen Raketenmotors in Deutschland (vier Jahre zuvor hatte Robert Goddart in den USA eine solche Rakete gestartet).

Valier hatte vor dem Ersten Weltkrieg ein naturwissenschaftliches Studium begonnen, doch seine Leidenschaft galt der Raumfahrt, die damals noch die Vision einiger Forscher und Tüftler war. Zu den Pionieren zählte der Physiker und Ingenieur Hermann Oberth, der in seiner Doktorarbeit unter dem Titel »Die Reise zu den Planetenräumen« 1922 alle Komponenten einer Flüssigkeitsrakete beschrieben hatte.

Das Buch inspirierte den 1895 in Bozen geborenen Valier, der sich als Journalist und Buchautor durchschlug, doch anders als Oberth glaubte er an eine Realisierung in kleinen Schritten: Die nötige Technik sollte mit Bodenfahrzeugen, später auch mit Flugzeugen erprobt werden. 1928 baute er den ersten Wagen RAK 1, der von Feststoffraketen angetrieben wurde. 1929 folgten die Raketenschlitten RAK BOB 1 und 2; auf dem zugefrorenen Starnberger See erreichte letzterer vermutlich 400 Kilometer pro Stunde.

Öffentliche Vorführungen seiner Prototypen machten Valier bekannt und halfen ihm bei der Suche nach Sponsoren und Experten mit dem nötigen Knowhow. Dazu gehörten 1927 der Rennfahrer Fritz von Opel sowie Wilhelm Sander, dessen Fabrik Signalraketen herstellte. In dem Erfinder Paul Heylandt und seiner Firma »Gesellschaft für Industriegasverwertung« schließlich fand Valier im Jahr 1929 Spezialisten für die Verflüssigung von Gasen.

Er kombinierte flüssigen Sauerstoff und verdünnten Spiritus: Organische Substanzen verbrennen in dem Oxidationsmittel explosionsartig, Flüssigsauerstoff wird daher noch heute für Hauptantriebsstufen verwendet. Die Brennkammer des hier abgebildeten RAK 7 bestand im Wesentlichen aus einem etwa 20 Zentimeter langen Stahlrohr, in dem die Treibstoffkomponenten vermischt und dann – angeblich durch ein Streichholz – angezündet wurden. Dieser Antrieb entwickelte eine Schubkraft von 200 bis 300 Newton.

Doch wenige Wochen nach der erfolgreichen Fahrt in Berlin explodierte die Brennkammer, Valier wurde von einem Splitter tödlich getroffen. Schon im Jahr darauf ließ Heylandt einen neuen Raketenwagen auf dem Flugplatz Tempelhof starten, und die internationale Presse berichtete darüber – ohne den Erfinder zu erwähnen. Wernher von Braun, ein Schüler Oberths, arbeitete seit 1933 an einer mit Flüssigsauerstoff und Alkohol betriebenen Rakete, und Valier drohte in Vergessenheit zu geraten. Um das Andenken ihres Mannes zu bewahren, überließ seine Witwe laut einem Schreiben der Reichskanzlei vom März 1934 den RAK 7 und den RAK BOB 2 Adolf Hitler. Dieser beauftragte Heylandt, die Objekte zu restaurieren, und schlug vor, sie anschließend dem Deutschen Museum zu überlassen.

Es sollte Wernher von Braun und seinem Team vorbehalten sein, erstmals Raketen mit Flüssigtreibstoff in den Weltraum zu schicken – die Vergeltungswaffe 2 beziehungsweise V2, die 1944 gegen England eingesetzt wurde. Seine und damit auch Valiers Erfahrungen brachte er nach dem Krieg in die amerikanischen Raumfahrtprogramme Mercury, Gemini und Apollo ein.

Jörg Wipplinger ist Wissenschaftsjournalist in Wien. **Klaus-Dieter Linsmeier** ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Die ferne Zukunft der Sterne

Manche meinen, die glorreichen Tage des Universums seien bereits vorüber – doch sie täuschen sich. In den kommenden Jahrmilliarden wird Faszinierendes im All geschehen. Zu den Highlights zählen explodierende Heliumzwerge und unzählige Planeten, auf denen Leben möglich ist.

KENN BROWN, MONDOLITHIC STUDIOS

FOTOLIA / JOHANN35

Schutz vor der Mutter

Eigentlich müsste das mütterliche Immunsystem jeden Fötus angreifen. Aber das werdende Leben verhindert dies mit speziellen Signalmolekülen: besonderen Antigenen, die eine Toleranz bewirken.

KING'S COLLEGE CAMBRIDGE UND THE ROYAL SOCIETY

100 Jahre Alan Turing

Der geniale Mathematiker war nicht nur an der Entschlüsselung deutscher Geheimkodes im Zweiten Weltkrieg beteiligt; wir verdanken ihm auch entscheidende Beiträge zur Theorie der Rechenmaschinen und zur biologischen Musterbildung.

Wer waren die ersten Amerikaner?

Jäger aus Asien folgten ihren Beutetieren über die heute versunkene Landbrücke Beringia und betraten Nordamerika vor etwa 13 000 Jahren. So weit das Schulwissen. Doch jüngste Forschungen zeigen, dass Menschen schon lange vorher in der Neuen Welt eintrafen!

Lurche in Lebensgefahr

Weltweit sterben massenhaft Amphibien, dahingerafft von einem Pilz. Zahllose Arten sind bereits verschwunden, darunter viele, die noch nicht einmal systematisch beschrieben wurden. Die Weltnaturschutzunion IUCN versucht, wenigstens die letzten Überlebenden vor dem Aussterben zu bewahren.

NEWSLETTER

Möchten Sie regelmäßig über die Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?

Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:
www.spektrum.com/newsletter

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

JUNI 2012

100 JAHRE
ALAN TURING

Mathematiker, Kryptoanalyst, Visionär

Spektrum DER WISSENSCHAFT 6/12

BIOLOGIE

Was den Fötus vor dem Immunsystem der Mutter schützt

VORGESCHICHTE

Die erste Besiedlung Amerikas

PORPHYRINE

Ein Ringmolekül verbindet Herbizide und Vampirsagen

Die ferne Zukunft des Kosmos

Die nächsten Billionen Jahre bieten noch manche Überraschung

7,90 € (D/A) · 8,50 € (L) · 14,– sFr.
D6179E

4 194058 407907 06

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

www.spektrum.de

Unsere Neuerscheinungen

Spektrum Spezial – Biologie, Medizin, Kultur 2/2012

DIE GRÖSSTEN RÄTSEL DER PHILOSOPHIE

Was ist der Mensch? Hat er einen freien Willen? Wie entsteht Bewusstsein? Was können wir überhaupt wissen? Was ist Gerechtigkeit? Viele der großen Fragen der Menschheit haben Philosophen schon in der Antike aufgeworfen und in jeder Epoche neu gestellt. Doch in einer Welt, die immer komplexer wird und sich rascher verändert als je zuvor, gehen den Philosophen die Fragen nicht aus. Und immer neue kommen hinzu, etwa die nach ethischen Grenzen des technischen Fortschritts. In diesem **Spektrum-Spezial** legen namhafte Philosophen dar, welche Rolle ihre Disziplin in unserer modernen Zeit spielt und was sie heute zu den größten Rätseln der Menschheit zu sagen hat. Dabei zeigt sich, wie spannend das Nachdenken über die Welt immer noch ist.

Das Spezial »Die größten Rätsel der Philosophie« kostet € 8,90 zzgl. Versand. Die Spezial-Reihen können auch unter www.spektrum.de/spezialabo bezogen werden.

SdW-Highlights 2/2012

KOSMISCHE URSPRÜNGE

Innerhalb weniger Generationen gelang es Wissenschaftlern, eine Chronologie des Universums zu skizzieren, die 14 Milliarden Jahre umfasst. Tief reichende Himmelsdurchmusterungen wiederum offenbaren das weitere Schicksal von Sternen und Galaxien. Zu den größten Überraschungen gehört die Entdeckung der Dunklen Energie, die nicht nur die Expansion des Alls beschleunigt, sondern womöglich auf eine neue, bislang unbekannte Physik hindeutet.

Das neue Highlights (unveränderter Nachdruck) kostet € 8,90 zzgl. Versand und erscheint am 08.06.2012. Dieses und weitere Sonderhefte finden Abonnenten von Spektrum der Wissenschaft zum Sonderpreis von € 7,40 (inkl. Inlandsversand) unter www.spektrum.de/aboplus

---

Spektrum Spezial – Physik, Mathematik, Technik 2/2012

MATHEMATHISCHE SPIELE UND STRATEGIEN

Wozu ist Mathematik eigentlich nütze? Auf diese beliebte Frage gibt das vorliegende Heft einige sehr konkrete Antworten. Die Zukunft hält häufig viele Ereignisse für einen bereit, über die man nur sehr magere Kenntnisse hat. Den todsicheren Tipp kann uns die Mathematik zwar nicht liefern, aber sie kann unsere Chancen optimieren, am Ende mit dem bestmöglichen Ergebnis dazustehen. Die hier versammelten Beiträge sind ursprünglich in der Rubrik »Mathematische Unterhaltungen« im Monatsheft von **Spektrum der Wissenschaft** erschienen.

Das Spezial »Mathematische Spiele und Strategien« kostet € 8,90 zzgl. Versand und erscheint am 25.05.2012. Die Spezial-Reihen können auch unter www.spektrum.de/spezialabo bezogen werden.

---

epoc 2/2012

ALBRECHT DÜRER – IN JUNGEN JAHREN ZUM GENIE

Schon früh zeigte sich das Genie in Albrecht Dürer. Doch seine außergewöhnliche Begabung war nicht der einzige Schlüssel zum Erfolg: Der Maler stammte aus einer wohlhabenden, künstlerisch begabten Familie und wuchs im besten Viertel Nürnbergs auf. Aus dem Inhalt:

> »Die Kunst steckt in der Natur«
> Mutter und Vater in neuem Licht
> Beim Malen über die Schulter geschaut
> Die Vermessung des Menschen

epoc kostet € 7,90 als Einzelheft und ist auch im Abonnement für € 27,– (4 Ausgaben pro Jahr) inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 23,–) zu beziehen.

Alle Hefte sind im Handel erhältlich oder unter:

Spektrum DER WISSENSCHAFT
WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

online: spektrum.de/lesershop
E-Mail: service@spektrum.com
Tel.: +49 6221 9126-743

Fax: +49 6221 9126-751
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg

Carsten Könneker
Chefredakteur
koenneker@spektrum.com

Chronologie der kosmischen Zukunft

Mariette diChristina war sichtlich beeindruckt. Soeben war die Chefredakteurin von »Scientific American« mit ihren rund 20 Kollegen aus aller Welt bis an die Grenze des beobachtbaren Universums vorgedrungen – und für einen Augenblick sogar dahinter. Der Leiter des Hauses der Astronomie (HdA) in Heidelberg, Markus Pössel, hatte die Crew von Wissenschaftsredakteuren auf eine spektakuläre Reise eingeladen: von der Erde ausgehend durch unser Planetensystem, aus der Milchstraße heraus, vorbei an Galaxien und Quasaren bis hin zur kosmischen Hintergrundstrahlung. Die Vorführung im hochmodernen, digitalen Planetarium im HdA auf dem Gelände des Max-Planck-Instituts für Astronomie bot den Teilnehmern des »Scientific American«-Familientreffens Ende April reichlich Stoff für angeregte Unterhaltungen.

Eine Expedition an die Grenzen des Universums ist naturgemäß eine Reise in die Vergangenheit: Je größer der Abstand zu einem kosmischen Ereignis, desto früher hat es stattgefunden. Dennoch versuchen Physiker auch, in die ferne Zukunft des Weltalls zu spähen – und stoßen dabei auf eine Reihe verblüffender Phänomene, etwa den Zerfall von Protonen oder das Verdampfen galaktischer Schwarzer Löcher. Der amerikanische Astronom und Wissenschaftsautor Donald Goldsmith erläutert sie in seiner Chronologie der kosmischen Zukunft ab S. 40.

Auch in der neuen Ausgabe von »Spektrum neo« blicken wir in die Zukunft. Allerdings bescheiden wir uns mit einer Expedition in das Jahr 2050. Wie wir dann wohnen werden, welche Verkehrs- und Kommunikationsmittel wir nutzen und wie wir die Artenvielfalt sowie das Klima unseres Planeten schützen können – das waren die Wunschthemen von Kindern und Jugendlichen in einer Befragung vom letzten Herbst. »Spektrum neo« richtet sich an 10- bis 14-jährige Mädchen und Jungen und erscheint in enger Kooperation mit dem Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik (IPN) in Kiel. Übrigens: Das viel gelobte »neo«-Konzept stammt nicht von »Scientific American«, sondern ist ein deutsches Eigengewächs. Auch dies imponierte der Kollegin aus den USA.

Eine anregende Lektüre wünscht
Ihr

AUTOREN IN DIESEM HEFT

Die französischen Immunologen **Edgardo D. Carosella** und **Nathalie Rouas-Freiss** erforschen Moleküle, die den Fötus während der Schwangerschaft vor den Immunattacken des mütterlichen Organismus schützen (S. 22).

Was haben Graf Dracula, der Unkrautvernichter Nitrofen und ein englischer König gemeinsam? Der Pflanzenphysiologe **Franck E. Dayan** von der University of Mississippi in Oxford und seine Tochter **Emilie** lüften das Geheimnis ab S. 30.

Staatliche Forschungsförderung wurde in der Sowjetunion großgeschrieben – mit Erfolg. Erst der Sputnikschock brachte westliche Staaten dazu, ebenfalls größere Geldsummen in die Wissenschaft zu stecken, resümiert der Physiker und Wissenschaftshistoriker **Alexei B. Kojewnikow** ab S. 66.

22 Immuntoleranz

80 Alan Turing

74 Amphibiensterben

50 Besiedlung Amerikas

BIOLOGIE & MEDIZIN

▸ **22 Wie sich das Ungeborene vor der Mutter schützt**
E. D. Carosella, N. Rouas-Freiss
Das Kind ist für die Mutter ein Fremdkörper. Nur weil der Fötus bestimmte Signalfaktoren aussendet, wird ihr Immunsystem nicht aktiv.

▸ **30 Ein Ring für die Farben des Lebens**
Franck E. und Emilie A. Dayan
Was verbindet König Georg III. von England mit Vampiren und Herbiziden? Antwort: eine Klasse von allgegenwärtigen organischen Pigmentmolekülen!

PHYSIK & ASTRONOMIE

TITELTHEMA

▸ **40 Die ferne Zukunft der Sterne**
Donald Goldsmith
Die glorreichen Tage des Universums sind noch lange nicht vorbei: In den kommenden Milliarden und Billionen Jahren werden völlig neue Himmelsphänomene auftreten.

SCHLICHTING!

48 Hart wie ein Brett
H. Joachim Schlichting
Verpackt man körnige Lebensmittel unter Luftabschluss, leisten sie erbitterten Widerstand gegen jegliche Verformung.

MENSCH & KULTUR

▸ **50 Die ersten Amerikaner**
Heather Pringle
Die Hinweise mehren sich, dass Menschen die Neue Welt früher als bislang gedacht erreichten – auch auf dem Seeweg.

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

60 Das ikosidodekaedrische Prismatohexakosihekatonikosachoron
Christoph Pöppe
Vierdimensionale archimedische Körper – groß und prachtvoll.

66 Sowjetische Forschung im Kalten Krieg
Alexei B. Kojewnikow
Anfangs galt militärische Stärke als oberstes Ziel. Erst allmählich förderte die Regierung auch zivile Projekte, vor allem die Raumfahrt.

40
TITELTHEMA

Die ferne Zukunft der Sterne

Die nächsten Billionen Jahre bieten noch manche Überraschung

ERDE & UMWELT

74 Das große Sterben
Joseph R. Mendelson III
Eine Pilzerkrankung rafft auf der ganzen Welt scharenweise Amphibien dahin. Zahllose Arten sind bereits verschwunden. Forscher versuchen, die verbleibenden Spezies mit Schutzprogrammen zu retten.

TECHNIK & COMPUTER

▸ **80 Alan Turing**
Zum 100. Geburtstag des großen Mathematikers

Der geistige Vater des Computers
George Dyson

Kode des Lebens
Sydney Brenner

Musterentstehung
John Reinitz

Der Mann hinter der Maschine
Andrew Hodges

Titelmotiv: Kenn Brown, Mondolithic Studios

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▸ gekennzeichnet.

Nach S. 88 folgt eine 28-seitige Sonderpublikation des Komitees für Astroteilchenphysik (KAT)

SPEKTROGRAMM

8 Massenzuwachs bei Schwarzen Löchern • Uralte Regenmulden • Magnetsinn von Tauben • Prägung des Immunsystems • Tarnkappe für Magnetfelder • Lagerfeuer vor einer Million Jahren

BILD DES MONATS

11 Schwamm mit Vergangenheit

FORSCHUNG AKTUELL

12 Können Tauben zählen?
Das Zahlenverständnis von Tauben ist dem mancher Affen ebenbürtig

14 Milchstraße voller Planeten
Im Schnitt umkreist jeden Stern mindestens ein Exoplanet

18 Proteinstrukturen vorhersagen
Eine neue Methode nutzt molekulare Verwandtschaftsbeziehungen

SPRINGERS EINWÜRFE

20 Denken heißt Zweifeln
Glaube und Vernunft im Widerstreit

WEITERE RUBRIKEN

3 Editorial

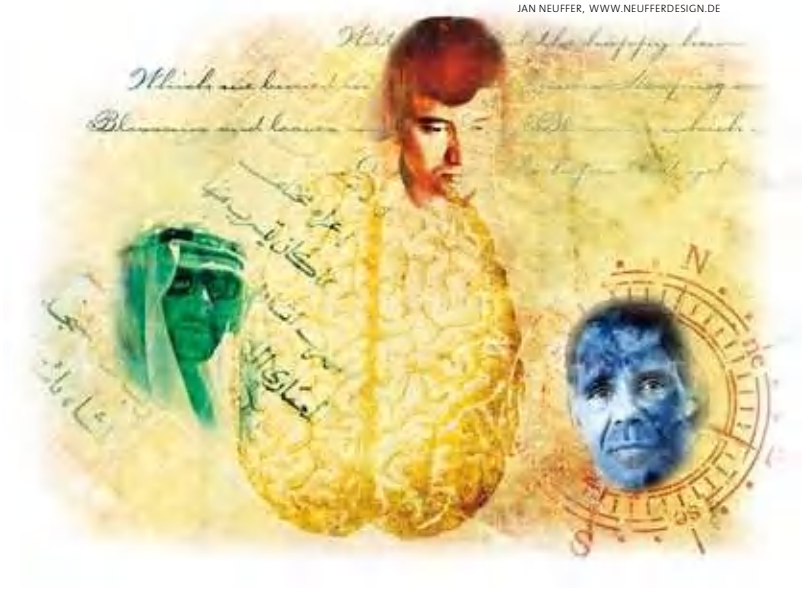
6 Leserbriefe/Impressum

89 Rezensionen
K. Wendland, A. Werner (Hg.): Facettenreiche Mathematik
Frans de Waal: Das Prinzip Empathie
Hans Peter Duerr: Die Fahrt der Argonauten
James Gleick: Die Information
Christian Ucke, H. Joachim Schlichting: Spiel, Physik und Spaß
u. a.

100 Wissenschaft im Rückblick
Von Atlantis zur Darmdiagnostik

101 Exponat des Monats
Schrittmacher für das Herz

102 Vorschau



JAN NEUFFER, WWW.NEUFFERDESIGN.DE

Die Sprache beeinflusst unsere Wahrnehmung – so etwa jene der Zeit: Für Europäer liegt »früher« links von »später«; Araber ordnen die Zeit von rechts nach links; für australische Aborigines liegt »früher« im Osten.

Wer übernimmt die Verantwortung?

Wir nehmen die Welt unterschiedlich wahr, je nachdem welche Sprache wir sprechen, erklärte die Psychologin Lera Boroditsky. (»Wie die Sprache das Denken formt«, April 2012, S. 30)

Karl-Heinz Lewin, Haar: Nach meiner Beobachtung ist die aktive oder passive Beschreibung eines Missgeschicks unabhängig von der Sprache und drückt aus, ob das Subjekt die Verantwortung übernimmt oder nicht. Ein Kind strenger Eltern wird im Deutschen wie im Englischen eher sagen: »Die Vase ist umgefallen und kaputtgegangen.« Ein verantwortungsbewusster Erwachsener sagt dagegen eher: »Ich habe leider die Vase umgestoßen.« Möglicherweise wirken hier auch kulturelle Unterschiede, die sich schneller ändern als die Sprache. Kinder verwendeten vor 50 Jahren in solchen Fällen noch häufiger die passiven Formen als heute.

Auch das Beispiel von Cheneys Jagdunfall belegt, dass es nicht die doch angeblich mehr aktiv beschreibende englische Sprache ist, die die zitierten gewundenen Sätze erzeugte, sondern der Wunsch, Cheney reinzuwaschen. Ein anderes Beispiel sind die Reden von Abgeordneten im Parlament. Obwohl alle dieselbe Sprache verwenden, beschreiben Konservative, Liberale, Grüne und Linke gleiche Sachverhalte doch oft sehr verschieden. Und Ingenieure reden anders als Buchhalter, sei es nun auf Spanisch oder auf Englisch.

Pionier der Flugmaschinenentwicklung

Michael Springer bezeichnete die jüngst vorgestellte Robotermöwe als die bisher beste Flugsimulationsmaschine. (»Fliegen wie ein Vogel«, Mai 2012, S. 24)

Helmut Schenk, Pforzheim: Der »SmartBird« ist zweifellos eine hervor-

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.)
Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser (Monatshefte), Dr. Gerhard Trageser (Sonderhefte)
Redaktion: Thilo Körkel (Online-Koordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke, Antje Findeklee (Bild des Monats); E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Editor-at-Large: Dr. Reinhard Breuer
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Redaktionsassistenz: Anja Albat-Nollau
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114
Verlagsleiter: Richard Zinken
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Carolin Frank, Andrea Jungbauer, Dr. Rainer Kayser, Tim Müller, Andreas Nestke, Claus-Peter Sesin.

Leser- und Bestellservice:
Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung:
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 7,90 (D/A) / € 8,50 (L) /sFr. 14,–; im Abonnement € 84,– für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Die Preise beinhalten € 8,40 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 8,40 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e.V. erhalten SdW zum Vorzugspreis.
Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Bereichsleitung Anzeigen: Marianne Dölz; Anzeigenleitung: Patrick Priesmann, Tel. 0211 887-2315, Fax 0211 887 97-2315; verantwortlich für Anzeigen: Christian Herp, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887 2481, Fax 0211 887-2686
Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 33 vom 01.01. 2012.
Gesamtherstellung: L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2012 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
75 Varick Street, New York, NY 10013-1917
Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven Inchcoombe, Vice President, Operations and Administration: Frances Newburg, Vice President, Finance, and Business Development: Michael Florek, Managing Director, Consumer Marketing: Christian Dorbandt, Vice President and Publisher: Bruce Brandfon

Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

ragende Entwicklungsarbeit. Was mich stört und schon an Geschichtsklitterung grenzt, ist der Anspruch der Firma: »Festo hat den Vogelflug entschlüsselt«; längst bekanntes Wissen wird dabei völlig unter den Tisch gekehrt.

Schon vor Jahrzehnten hat Prof. Dr. Erich von Holst in seinen bahnbrechenden Arbeiten zum Vogelflug erkannt, publiziert und in frei fliegenden Modellen nachvollzogen, was den Kern des Schwingenflugs ausmacht. Es ist dies die synchrone Koppelung von Schlagbewegung und einer Torsionsbewegung des Außenflügels. Erich von Holst hat das durch gezielte Torsionsweichheit der Außenflügelkonstruktion erreicht. Beim SmartBird geschieht es durch »aktive« (angetriebene) Verdrehung, was sicher einen Fortschritt darstellt. Aber die Vorarbeiten von Erich von Holst völlig zu unterschlagen, ist unwissenschaftlich.

Evolution der Intelligenz

Warum wir Menschen nicht mehr viel intelligenter werden können, erklärte Douglas Fox. (»Die Grenzen des Gehirns«, Mai 2012, S. 26)

Walter Weiss, Kassel: Eine messbare evolutionäre Verbesserung des Gehirns würde, wäre sie »technisch« möglich, sicher 50 000 Jahre oder länger benötigen. Sollte trotz aller aufgelisteten Gegengründe eine Verbesserung des Gehirns auftreten, könnte sie nur sehr wenige Einzelne – vielleicht sogar nur einen einzigen Menschen – betreffen, würde wegen der immensen Anzahl der Menschen in dem ungeheuer großen Genpool regelrecht ertrinken, für die Art Mensch also wirkungslos bleiben.

Doch nicht zuletzt hat es zu allen Zeiten immer wieder Menschen mit herausragenden Gehirnen gegeben – aus der jüngsten Vergangenheit erwähne ich nur Albert Einstein. Trösten wir uns damit, dass wir eine generelle Verbesserung des menschlichen Gehirns deswegen nicht brauchen, weil wir kulturell in der Lage sind, die gedanklichen Leistungen der sehr wenigen Menschen mit herausragenden Gehirnen für die ganze Menschheit zu archivieren, zu bewahren und zu nutzen.

Fabian Klauke, Odenthal: Zusätzlich zu den möglichen physikalischen Begrenzungen des Wachstums unseres Hirns ist eine Weiterentwicklung unserer Denkleistung wohl auch dadurch begrenzt, dass höhere Intelligenz zur heutigen Zeit keinen Selektionsvorteil im biologischen Sinn mehr darstellt: Nach meinem Wissen ist die Leistungsfähigkeit des Hirns weder ein Prädiktor für Lebenszeit noch für die Fortpflanzungsrate.

Mögliches mit Faktischem verwechselt?

Der Physiker Claus Kiefer stellte Ansätze vor, wie Quantenphysik und allgemeine Relativitätstheorie vereint werden können. (»Auf dem Weg zur Quantengravitation«, April 2012, S. 34)

Gunter Berauer, München: Der Autor vertritt die Interpretation von Schrödingers Gedankenexperiment, dass die Katze in dem Kasten gleichzeitig tot und lebendig sei, solange man noch nicht nachgeschaut habe. Diese Interpretation wird zwar immer wieder verwendet, verwechselt aber Mögliches mit Faktischem.

Solange der äußere Beobachter nicht in den Kasten hineingeschaut hat, gibt es für ihn lediglich die beiden Möglichkeiten »Katze tot« und »Katze lebendig« gleichzeitig nebeneinander. Die Möglichkeiten existieren in überlagerter Form. Das gilt genauso aber beispielsweise auch bei einen Lottospieler, für den es die beiden Möglichkeiten »gewonnen« und »verloren« gleichzeitig und nebeneinander gibt, solange die Lottozahlen noch nicht gezogen wurden oder ihm noch nicht bekannt sind.

In der Aussage, Schrödingers Katze »sei« gleichzeitig tot und lebendig, überlagert man aber nicht mehr Möglichkeiten, sondern Fakten. Und genau das ist sinnlos, wie man leicht am Beispiel des Lottospielers erkennt: Denn sonst dürfte man mit demselben Recht ebenso behaupten, der Lottospieler habe, solange er die Zahlen noch nicht kennt, gleichzeitig gewonnen und verloren.

Antwort des Autors Claus Kiefer:
Die Quantentheorie sagt voraus, dass Schrödingers Katze gleichzeitig tot *und* lebendig ist. Das ist der wichtige Unterschied zum klassischen Lottospieler, der gewinnt *oder* verliert. Im klassischen Grenzfall kommt man von dem quantenmechanischen *und* zum klassischen *oder*; in der Praxis geschieht dies durch die im Text erwähnte Dekohärenz, wonach man die Katze als tot oder lebendig betrachten darf, unabhängig davon, ob ein Beobachter in den Kasten schaut oder nicht.

FOLGEN SIE UNS IM INTERNET

facebook
www.spektrum.de/facebook

YouTube
www.spektrum.de/youtube

studiVZ
www.spektrum.de/studivz

twitter
www.spektrum.de/twitter

BRIEFE AN DIE REDAKTION

... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf www.spektrum.de/leserbriefe oder schreiben Sie mit Ihrer kompletten Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Leserbriefe
Sigrid Spies
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

Die vollständigen Leserbriefe und Antworten der Autoren finden Sie ebenfalls unter: www.spektrum.de/leserbriefe

ASTROPHYSIK

Schnelles Wachstum für Schwarze Löcher

In jungen Galaxien nehmen die zentralen Schwarzen Löcher vor allem dadurch an Masse zu, dass sie Gas verschlingen. Dieses wirbelt zunächst in einem flachen Ring, der Akkretionsscheibe, um das Zentralobjekt. Durch innere Reibung verliert es seinen Drehimpuls, wodurch es dem Schlund immer näher kommt und schließlich darin verschwindet.

CHRISTOPHER J. NIXON, ANDREW R. KING UND DANIEL J. PRICE

Kreisen zwei Gasscheiben (blau) im 150-Grad-Winkel um ein Schwarzes Loch, bildet das nach innen stürzende Gas eine weitere sehr dichte Scheibe (weiß). So wächst das Schwarze Loch schneller.

Allerdings ist dieser Prozess relativ langsam, was die Frage aufwirft, warum auch schon junge Galaxien extrem massereiche Schwarze Löcher enthalten. Diese Monster müssen sehr schnell gewachsen sein – wie, ist bislang unklar. Astronomen um Christopher Nixon von der University of Leicester (England) schlagen jetzt vor, dass um ein Schwarzes Loch nicht nur eine einzelne Akkretionsscheibe wirbeln kann. Gäbe es davon mehrere mit entgegengesetztem Drehsinn, würden sie sich gegenseitig bremsen und einen großen Teil ihres Drehimpulses verlieren, wodurch das Gas sehr viel rascher in den Schlund fiele. Im chaotischen Zentrum junger Galaxien, in das Gaswolken aus verschiedenen Richtungen einfallen, bilden sich solche gegensinnig rotierenden Scheiben vermutlich häufig.

Nixon und seine Kollegen erstellten Computersimulationen eines Schwarzen Lochs, das von zwei Akkretionsscheiben umgeben ist. Dabei variierten sie den anfänglichen Winkel zwischen den Scheiben in 30-Grad-Schritten. Laut den Berechnungen stürzt deutlich mehr Masse pro Zeiteinheit nach innen, wenn die Scheiben um mehr als 90 Grad gegeneinander verkippt sind. Beträgt der Winkel 150 Grad (Bild), wächst das Schwarze Loch mehr als 100-mal schneller als bei null Grad. Womöglich erklärt das, wie die zentralen Schwarzen Löcher in jungen Galaxien so schnell zu ihrer Größe kamen.

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, im Druck

KLIMAFORSCHUNG

Fossile Regenmulden geben Hinweise auf Uratmosphäre

Mit einer ungewöhnlichen Methode haben Forscher um Sanjoy Som von der University of Washington (USA) Erkenntnisse über die frühe Erdatmosphäre gewonnen. Sie untersuchten 2,7 Milliarden Jahre alte »Einschlagkrater« von Regentropfen, die sich in Tuffstein erhalten haben. Das Material stammt aus der Nähe der Stadt Prieska in Südafrika.

Die Größe solcher Regenmulden hängt vom Durchmesser der Tropfen ab, aber auch vom Druck der Erdatmosphäre. Denn der Luftwiderstand begrenzt die Fallgeschwindigkeit des Regens, und zwar umso mehr, je dichter die Atmosphäre ist. Dank dieser Zusammenhänge konnten die Forscher aus den Abmessungen der versteinerten Krater herleiten, welche Luftdichte damals herrschte. Hierbei stützten sie sich auf experimentelle Vergleichsdaten, die sie ermittelt hatten, indem sie verschieden große Wassertropfen auf Vulkanasche fallen ließen und jeweils die Größe der Einschläge dokumentierten.

Laut den Ergebnissen lag die bodennahe Luftdichte vor 2,7 Milliarden Jahren wahrscheinlich bei unter 1,3 Kilogramm pro Kubikmeter; der heutige Wert beträgt 1,2. Das ist wichtig für die Debatte, warum auf der Erde damals ein mildes Klima mit flüssigem Wasser herrschte, obwohl die Sonne um etwa 20 Prozent schwächer schien. Einige Forscher spekulieren, dass die Dichte der frühen Atmosphäre mehrfach höher gewesen sei als heute und der Treibhauseffekt entsprechend ausgeprägter. Die neuen Ergebnisse sprechen gegen diese Annahme.

Allerdings führen bei den Rechnungen bereits kleine Abweichungen der Tropfengröße zu großen Unterschieden beim ermittelten Luftdruck. Die Ergebnisse seien deshalb mit beträchtlichen Unsicherheiten behaftet, geben die Studienautoren zu.

WLADY ALTERMANN, UNIVERSITY OF PRETORIA

Uralte Regenspuren: Die Tropfen schlugen vor langer Zeit in lockeren vulkanischen Auswurf ein, der sich später verfestigte.

Nature 484, S. 359–362, 2012

BIOLOGIE

Sitz des Magnetsinns bei Tauben bleibt rätselhaft

Felsentauben *(Columbia livia)* finden aus großer Entfernung zum heimatlichen Schlag zurück, wobei sie sich unter anderem am Erdmagnetfeld orientieren. Bisher nahmen Wissenschaftler an, dass ihr Magnetsinn im Ansatz des Oberschnabels sitzt – in Form eines Rezeptors aus eisenhaltigen Nervenzellen. David Keays vom Institut für Molekulare Pathologie in Wien und seine Kollegen haben diese Vermutung nun jedoch widerlegt.

Mittels Magnetresonanz- und Computertomografie (MRT und CT) untersuchte das Team die eisenhaltigen Zellen in der oberen Schnabelhälfte der Tiere. Ihre Anzahl und Verteilung unterschieden sich überraschend stark zwischen Individuen, was nicht zu einer Rolle als Magnetrezeptor passt. Färbetechniken und mikroskopische Untersuchungen belegten zudem, dass die Zellen typische Merkmale von Makrophagen aufweisen – spezialisierten weißen Blutkörperchen, die eine wichtige Rolle bei der Immunabwehr spielen. So besaßen die Zellen tentakelähnliche Fortsätze, eingelagerte Eisendepots und wasserunlösliche Komplexe aus Eisen und Proteinen.

Makrophagen helfen nicht nur, Infektionen zu bekämpfen, sie bauen auch überalterte rote Blutkörperchen ab, wobei sie Eisen aufnehmen. Da sie oft in der Schleimhaut von Atemwegen zu finden sind, erscheint ihr Vorkommen im Schnabelansatz nicht überraschend. Eines der Tiere hatte dort eine entzündliche Verletzung, die von besonders vielen eisenhaltigen Zellen umgeben war. Auch an anderen Stellen im Taubenkörper waren sie zu finden.

JOHANNES RIEGLER, UNIVERSITY COLLEGE LONDON (UCL)

Computergrafik von einem der untersuchten Taubenschnäbel, erstellt mit Hilfe von MRT- und CT-Daten

Mit Sinneswahrnehmung haben Makrophagen jedoch nichts zu tun. Die Forscher halten es daher für unwahrscheinlich, dass der Magnetsinn der Tauben im Ansatz des Oberschnabels sitzt. Womöglich sei er im Riechepithel der Nasenhöhle lokalisiert, das etwa bei der Regenbogenforelle als Ort des Magnetsinns in Betracht gezogen wird.

Nature 484, S. 367–370, 2012

IMMUNOLOGIE

Darmflora formt körpereigenes Abwehrsystem

Immer mehr Indizien deuten darauf hin, dass Asthma, Allergien und andere Autoimmunerkrankungen zunehmen, weil viele Menschen im Kindesalter nicht ausreichend mit Mikroben in Kontakt kommen. Zwei Studien an Mäusen untermauern diese These nun.

Torsten Olszak von der Harvard Medical School und seine Kollegen berichten, dass bei Mäusen, die in keimfreier Umgebung aufgewachsen sind, deutlich mehr so genannte natürliche Killerzellen (NK-Zellen) die Darmschleimhaut und das Lungengewebe besiedeln. Das geht einher mit überschießenden Immunreaktionen: Die Tiere reagieren sensibler auf künstlich hervorgerufene Entzündungen und Asthma auslösende Stoffe.

Bekamen die keimfrei aufgezogenen Nager jedoch ihre natürlich vorkommenden Darmmikroben eingeimpft, normalisierte sich sowohl ihre Immunreaktion als auch die Zahl ihrer NK-Zellen in Darm und Lunge. Allerdings funktionierte das nur bei jungen Tieren und nicht mehr im Erwachsenenalter. Offenbar, vermuten die Forscher, gibt es ein Zeitfenster während der Frühphase des Lebens, in dem der Organismus seine Abwehrkräfte auf die Mikroben abstimmt, mit denen er in Kontakt tritt.

Zu ähnlichen Schlüssen kommt ein Team um David Hill von der University of Pennsylvania (USA). Die Forscher zerstörten die Darmflora junger Mäuse mit Antibiotika. Im Erwachsenenalter wiesen die Tiere daraufhin eine übertrieben empfindliche Körperabwehr auf, mit chronisch erhöhten Blutwerten von IgE-Antikörpern und so genannten basophilen Immunzellen, wie sie bei allergischen Reaktionen vorkommen.

Demnach sorgt die mikrobielle Besiedlung des Darms für ein ausbalanciertes Immunsystem. Beide Forschergruppen vermuten, dass ähnliche Zusammenhänge auch beim Menschen gelten.

Science 10.1126/science.1219328, 2012
Nature Medicine 18, S. 538–546, 2012

MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de

Aktuelle Spektrogramme
finden Sie täglich unter
www.spektrum.de/spektrogramm

PHYSIK

Für Magnetfelder unsichtbar

Weltweit arbeiten Forscher an verschiedenen Arten von »Tarnkappen«, die Objekte vor sichtbarem Licht, vor Mikro- oder Schallwellen verbergen sollen. Ein Team um Fedor Gömöry von der Slowakischen Akademie der Wissenschaften in Bratislava erweitert nun das Spektrum um einen Entwurf, der vor der Detektion durch statische Magnetfelder schützt.

Es handelt sich um einen Hohlzylinder, der aus zwei konzentrischen Schichten besteht. Die innere ist supraleitend, die äußere ferromagnetisch. Beide wirken gegensätzlich auf von außen angelegte Magnetfelder: Der Supraleiter verdrängt die Feldlinien aus seinem Innern, der Ferromagnet bündelt sie in sich. Werden diese Effekte geschickt aufeinander abgestimmt, lenkt der Hohlzylinder das Feld um sich herum, ohne es zu stören. Ein Gegenstand in seinem Innern ist dann durch Magnetfeldmessungen nicht nachweisbar.

Mit Hilfe der Maxwell-Gleichungen, die die Phänomene des Elektromagnetismus beschreiben, berechnete das Team, welche Eigenschaften die Schichten hierfür haben müssen. Für Praxistests konstruierten die Forscher einen Zylinder mit 12,5 Millimeter Innendurchmesser. Die Schichten wickelten sie aus dünnen Lagen eines Hochtemperatursupraleiters sowie einer Eisen-Nickel-Chrom-Legierung. Damit ließen sich gute Tarnergebnisse erzielen, auch bei relativ starken Feldern – im Versuch 40 Millitesla.

Der Zylinder lässt sich im Prinzip beliebig groß oder klein auslegen. Da er zudem nur aus handelsüblichen Materialien besteht und lediglich flüssigen Stickstoff zur Kühlung benötigt, ließe er sich laut den Autoren problemlos in technische Anwendungen einbinden. Denkbar wäre etwa die Abschirmung von Geräten, die auf Magnetfelder empfindlich reagieren.

Science 335, S. 1466–1468, 2012

JORDI PRAT, UNIVERSITAT AUTÒNOMA DE BARCELONA (UAB)

Der Ferromagnet (1) bündelt das Magnetfeld, der Supraleiter (2) verdrängt es. Kombiniert (3) ergeben sie eine Tarnkappe.

ARCHÄOLOGIE

Lagerfeuer vor einer Million Jahren

In der südafrikanischen Wonderwerk-Höhle sind Forscher auf Reste einer Feuerstelle gestoßen, die etwa eine Million Jahre alt sind. Zuvor waren in derselben Bodenschicht bereits Faustkeile und andere Steinartefakte gefunden worden. Damit handelt es sich um den bisher frühesten Nachweis für die gezielte Nutzung des Feuers durch den Menschen, hier durch *Homo erectus*.

Das Team um den Archäologen Francesco Berna von der Boston University (USA) legte 30 Meter hinter dem Höhleneingang eine dünne Sedimentlage mit Aschespuren, verbrannten Knochensplittern und Pflanzenresten frei. Die magnetische Orientierung dieser Schicht ordneten sie der Jaramillo-Umkehr des Erdmagnetfelds zu, die vor zirka einer Million Jahren stattfand. Mikroskopische und spektroskopische Untersuchungen ergaben, dass die Knochensplitter maximal 700 Grad Celsius ausgesetzt gewesen waren. Vermutlich seien an der Stelle Gras, Blätter und Reisig verbrannt, aber keine großen Holzstücke, schreiben die Forscher. Reste von verkohlten Halmen waren in der entsprechenden Sedimentlage auch zu finden.

Da der Fundort tief im Höhleninnern liegt, schließen die Forscher natürliche Ursachen für den Brand aus. Allerdings fand sich kein Indiz dafür, dass die Frühmenschen die Flammen selbst entzündet hatten. Auch legten sie offenbar keine klar umgrenzten Feuerstellen an. Dennoch sprechen die Befunde dafür, dass *Homo erectus* schon vor einer Million Jahren kontrolliert Feuer nutzte. Bislang datierten die ältesten sicheren Beweise für anthropogenen Feuergebrauch auf weniger als 400 000 Jahre und wurden vor allem dem modernen Menschen sowie dem Neandertaler zugeschrieben.

PNAS 10.1073/pnas.1117620109, 2012

PAUL GOLDBERG, BOSTON UNIVERSITY

Kleine Knochensplitter (Pfeil) im Boden der Wonderwerk-Höhle zeigen Brandspuren, die rund eine Million Jahre alt sind.

SCHWAMM MIT VERGANGENHEIT

WERNER E. G. MÜLLER, UNIVERSITÄTSMEDIZIN MAINZ

Im Ostchinesischen Meer stießen Forscher auf einen neuen Typ von Klimaarchiv: den Glasschwamm *Monorahphis chuni*. Der äußerst langlebige Tiefseebewohner bildet als Skelett einzigartige Nadeln aus Siliziumdioxid, die bis zu drei Meter lang und einen Zentimeter dick werden. Die lichtmikroskopische Aufnahme eines Querschnitts zeigt den Aufbau aus Schichten, die von innen nach außen gewachsen sind, ähnlich den Jahresringen bei Bäumen.

Insgesamt ist das untersuchte Skelett rund 11 000 Jahre alt, wobei das Bild nur einen kleinen Ausschnitt von 0,8 Millimeter Breite darstellt. Die unterschiedliche chemische Zusammensetzung der einzelnen Lamellen weist darauf hin, dass die Wassertemperatur in der Umgebung mehrfach stark schwankte – zwischen zwei und zehn Grad Celsius. Auslöser waren vermutlich Ausbrüche von Unterwasservulkanen. *Chemical Geology 300–301 S. 143–151, 2012*

KOGNITIONSFORSCHUNG

Können Tauben zählen?

Eine Studie aus Neuseeland zeigt, dass Tauben über ein Zahlenverständnis verfügen, das demjenigen mancher Affen ebenbürtig ist.

VON STÉPHANE HESS

Hinter drei Äpfeln, drei Nüssen und drei Holzstückchen als Gemeinsamkeit die Anzahl zu erkennen und diese auch noch mit einem Symbol wie »3« zu kennzeichnen: Das gilt zu Recht als eine Abstraktionsleistung und eine – elementare – Form mathematischen Denkens. Nach verbreiteter Ansicht ist unter allen irdischen Organismen nur der Mensch dazu in der Lage.

Doch erstaunlicherweise verfügen selbst Tauben, die nicht gerade als besonders intelligente Tiere gelten, über ein gewisses Zahlenverständnis. Das ergaben Experimente, die Damian Scarf, Harlene Hayne und Michael Colombo vom Fachbereich Psychologie der University of Otago in Neuseeland durchgeführt haben *(Science 334, S. 1664, 2011)*.

Da man eine Taube nicht direkt danach fragen kann, was sie gerade denkt, mussten die Forscher die abstrakten Konzepte in ihrem Kopf – oder zumindest Ansätze davon – aus ihrem Verhalten erschließen. Dabei waren die Experimente so anzulegen, dass sie keine einfacheren Erklärungen zuließen. Das ist gar nicht so leicht: Wenn eine Taube von zwei Körnerhaufen den größeren bevorzugt, heißt das noch nicht, dass sie zählen kann, geschweige denn über einen abstrakten Zahlbegriff verfügt. Selbst wenn man eine Taube mit Erfolg darauf trainiert, verschiedene Bilder in einer bestimmten Reihenfolge anzupicken, ist nicht klar, ob sie sich nicht einfach daran gewöhnt hat, diese Bilder ihrem optischen Eindruck nach zu sortieren, ohne sich der in ihnen repräsentierten Zahlen bewusst zu sein.

Für das Design ihrer Experimente konnten Scarf, Hayne und Colombo auf frühere Arbeiten zurückgreifen. Elisabeth M. Brannon und Herbert S. Terrace hatten 1998 gezeigt, dass Affen Bilder mit unterschiedlich vielen geometrischen Formen nach der Anzahl der dargestellten Objekte ordnen können *(Science 282, S. 746, 1998)*. Sie setzen zwar das abstrakte Konzept einer bestimmten Anzahl nicht wie wir mit einem Symbol in Beziehung, wenden aber doch die ebenfalls abstrakte Regel an, dass es nur auf die Anzahl ankommt und auf nichts sonst.

Acht kleine Quadrate sind mehr als vier große Ellipsen

Eine gleichartige Aufgabe stellten die neuseeländischen Forscher auch ihren Tauben. Während der Trainingsphase konfrontierten sie die Vögel zunächst mit drei Bildern auf einem Monitor, auf denen verschiedene Anzahlen von Objekten zu sehen waren. Wenn eine Taube diese in der richtigen Reihenfolge – von der kleinsten bis zur größten Anzahl – mit dem Schnabel anpickte, wurde sie mit Getreidekörnern belohnt. Die Objekte in den Bildern variierten in Form, Farbe und Größe, so dass die Tauben nicht einfach auf diese offensichtlichen Merkmale reagieren konnten (Bild rechts).

Um zu testen, ob die Tauben darüber hinaus über ein Konzept für Anzahlen allgemein verfügten, gaben die Forscher ihnen noch schwerere Aufgaben. So wurden die Vögel lediglich darauf trainiert, Zahlen von 1 bis 3 der Größe nach zu ordnen, mussten aber in der nachfolgenden Testphase auch Zahlen von 1 bis 9 miteinander vergleichen.

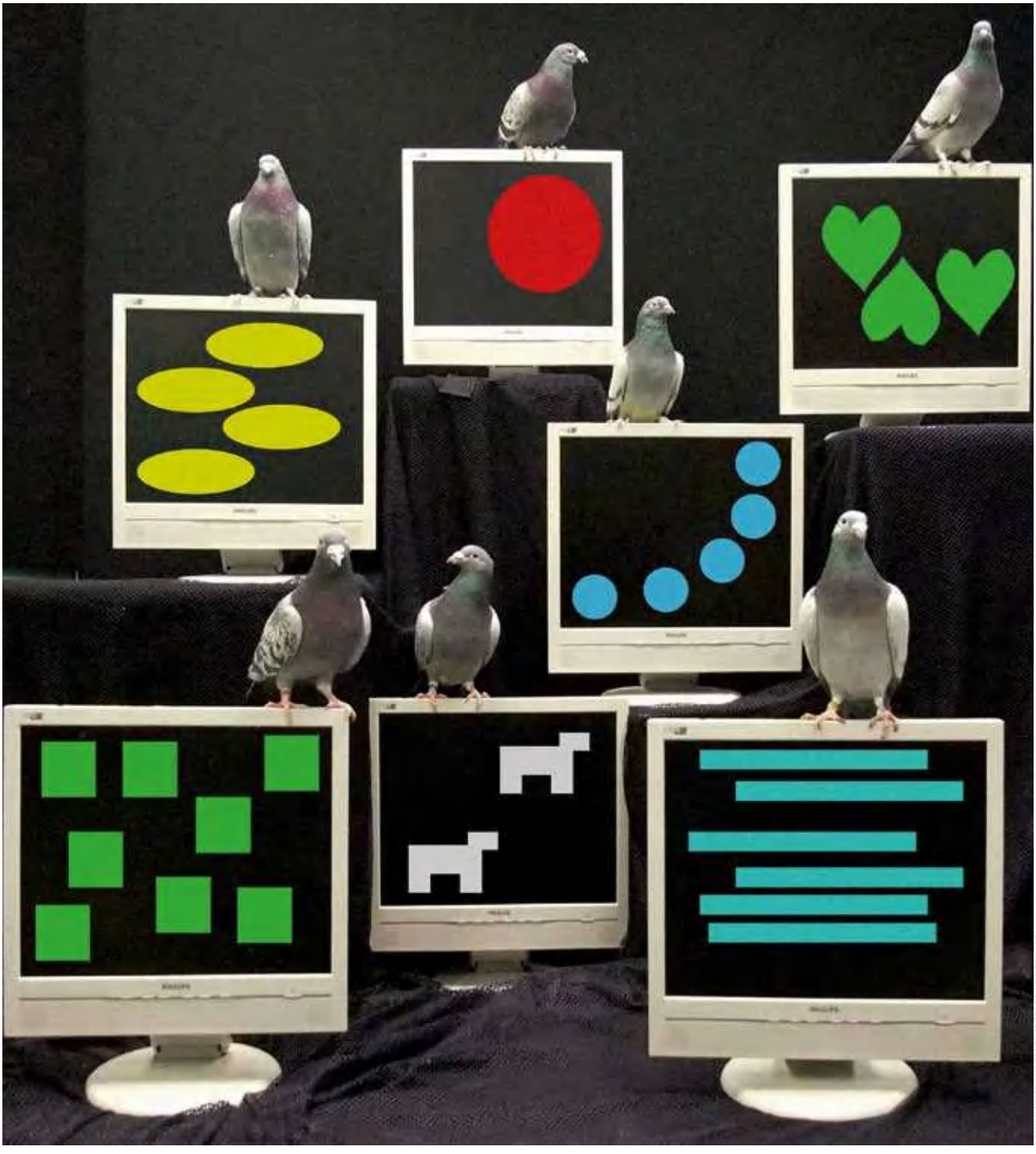
Die Ergebnisse der Studie sind in der Tat erstaunlich. Die Tauben pickten in mehr als 80 Prozent der Fälle zwei Bilder in der richtigen Reihenfolge – zuerst dasjenige mit der kleineren Anzahl

WILLIAM VAN DER VLIET FÜR STÉPHANE HESS

Damian Scarf und seine Kollegen boten ihren Tauben auf dem Bildschirm geometrische Gebilde in unterschiedlicher Anzahl, Größe, Form und Farbe an (rechts). Es gelang den Vögeln, zu erfassen, dass es unter allen Merkmalen ausschließlich auf die Anzahl ankommt. Bei den Versuchsdurchläufen picken die Tiere auf den berührungsempfindlichen Bildschirm, worauf als Bestätigung für eine drittel Sekunde ein grüner Rahmen erscheint (oben).

von Objekten – an, obwohl eine der beiden Anzahlen nicht in der Trainingsphase vorgekommen war. Lagen sogar beide Zahlen außerhalb des Trainingsbereichs, gelang ihnen das immerhin noch zu ungefähr 70 Prozent. Damit erreichen die Tauben ähnliche Werte wie zuvor die Affen. Die Trefferquote war umso größer und die Reaktionszeit umso kürzer, je weiter die beiden zu vergleichenden Zahlen auseinanderlagen. Auch dieses Verhalten hatten schon die Affen gezeigt.

Inwiefern das Zahlenverständnis der Tauben demjenigen von Menschen



DAMIAN SCARF, UNIVERSITY OF OTAGO, NEW ZEALAND

gleicht, bleibt offen; die Autoren der Studie stellen dazu denn auch keine Behauptung auf. So ließe sich einwenden, dass jemand, der das Konzept von Zahlen verstanden hat, das Zahlenpaar 4/5 mit der gleichen Leichtigkeit richtig anordnet wie das Zahlenpaar 2/9. Dies war bei den Tauben nicht der Fall. Damian Scarf vermutet, dass die Tauben die Objekte auf den Bildern nicht wirklich zählen, sondern deren Anzahl schätzen. Ein Mensch, dem man dieselbe Aufgabe stellt und nicht genug Zeit zum Abzählen der Objekte lässt, habe ebenfalls mehr Mühe, Zahlenpaare mit kleinen Unterschieden richtig anzuordnen.

Gleichwohl lässt die Tatsache, dass Tauben eine abstrakte Regel (»kleine Anzahlen zuerst, große Anzahlen danach anpicken«) umzusetzen vermögen, auf Ansätze abstrakten Denkens schließen. Indem der Mensch diese Fähigkeit nicht nur Primaten, sondern auch gewissen Vögeln zugestehen muss, erleidet die traditionelle Vorstellung von seiner Einzigartigkeit einen weiteren Dämpfer.

Dass Angehörige der sehr verschiedenen Tiergruppen Säuger und Vögel unabhängig voneinander dieselbe – oder zumindest eine ähnliche – Fähigkeit entwickelt haben, eröffnet die Möglichkeit interessanter Vergleiche. Daraus ließe sich, so die Hoffnung der Autoren, Aufschluss darüber gewinnen, welche Rolle dem Zahlenverständnis im Überlebenskampf der Tiere zukommt und welche Gehirnstrukturen dafür erforderlich sind.

Stéphane Hess hat in Bern und Fribourg (Schweiz) Philosophie und Biologie studiert und arbeitet als freier Journalist.

ASTRONOMIE

Milchstraße voller Planeten

Astronomen konnten mit Hilfe von Mikro-Gravitationslinsen und ausgefeilter Statistik zeigen: In der Milchstraße wird jeder Stern im Schnitt von mindestens einem Planeten umkreist. Wahrscheinlich sind auch erdähnliche darunter.

VON JOACHIM WAMBSGANSS

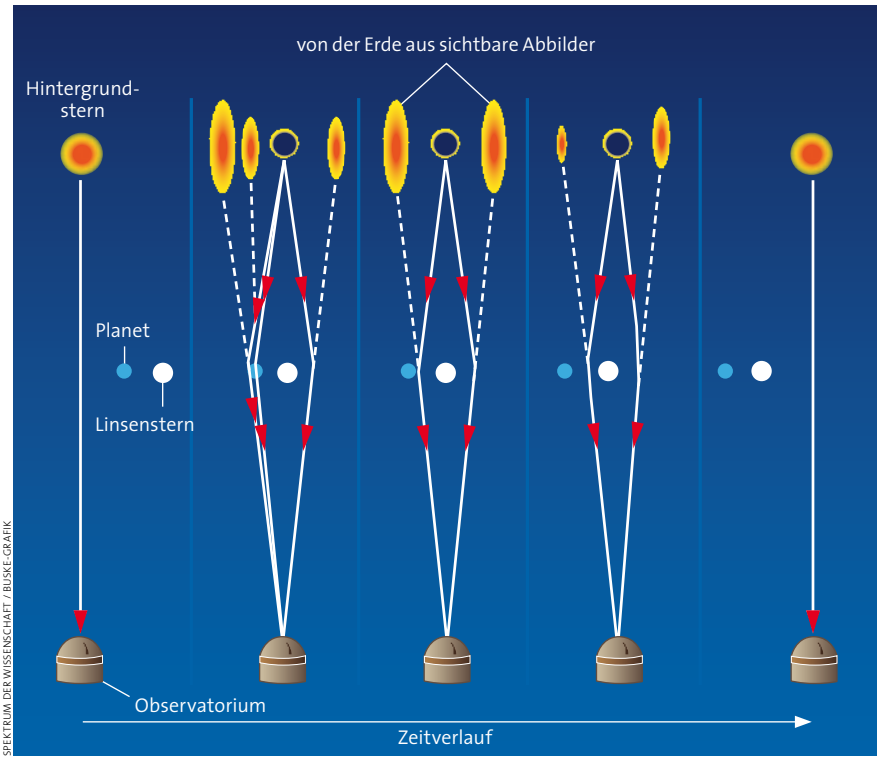
Im Jahr 1995 konstatierte der renommierte amerikanische Wissenschaftler David C. Black über die Suche nach extrasolaren Planeten: »Die Ergebnisse bis heute sind so, dass keine anderen Planetensysteme entdeckt wurden, und die Abwesenheit einer Entdeckung wird allmählich statistisch signifikant.« Doch bereits im Oktober desselben Jahres veränderte sich die Lage dramatisch: Die Schweizer Astronomen Michel Mayor und Didier Queloz hatten bei einem Stern in 42 Lichtjahren Entfernung das Objekt 51 Pegasi b entdeckt – den ersten Exoplaneten um einen sonnenähnlichen Stern. Das öffnete die Tür zu einem völlig neuen Gebiet der Astronomie: extrasolare Planeten! Dieser Forschungszweig entwickelt sich seitdem zu einem der am schnellsten wachsenden Bereiche der Astrophysik. Durch neue Beobachtungen und mit statistischen Computerverfahren konnte unser Forschungsteam Anfang des Jahres nachweisen, dass Exoplaneten offenbar fast überall in der Milchstraße auftreten *(Nature 481, S. 167, 2012)*.

Mit ganz verschiedenen, meist indirekten Methoden begaben sich die Wissenschaftler in den letzten Jahren auf Planetenjagd. Unterschiedliche Techniken kommen zum Einsatz: etwa die spektroskopische Messung der Radialgeschwindigkeit, die fotometrische Transitmethode oder die astrometrische Positionsbestimmung. Damit zeichnen die Astronomen die variablen Signale eines Muttersterns so exakt wie möglich auf, um die Existenz von Planeten nachzuweisen. Daneben nutzt die Methode der Mikrogravitationslinsen (»Microlensing«) die Tatsache, dass das Licht eines im Hintergrund liegenden Sterns von einem davorstehenden Planeten geringfügig abgelenkt wird. Und schließlich gelingt es inzwischen schon ab und zu, einige Planeten direkt zu fotografieren.

Jede dieser Methoden hat Stärken und Schwächen. Mit einigen ist es beispielsweise leichter, Planeten mit kurzen Perioden zu finden, andere können wiederum nur solche Systeme nachweisen, die wir ziemlich genau von der Seite sehen. Dafür lässt sich bei solchen »Transit-Planeten« dann sogar die Atmosphäre analysieren. Ein Ziel der Exoplanetenforschung ist natürlich auch, auf anderen Planeten Lebensspuren zu finden. Und dafür wäre der Nachweis von Sauerstoff oder Ozon in der Lufthülle bereits ein starkes Indiz.

Kosmische Hintergrundlampen

Eine weitere wichtige Frage lautet: Stellen Planeten um Sterne eher die Ausnahme dar, oder sind sie die Regel? Für die Statistik von Planetensystemen ist die Mikrolinsenmethode besonders gut geeignet. Sie sucht nämlich gar nicht gezielt nach einzelnen Planeten um bestimmte Sonnen. Stattdessen nutzt man beim Microlensing zahllose weit entfernte Sterne lediglich als »Hintergrundlampen« und misst deren Helligkeit immer wieder. Wenn nun ein anderer, von uns aus gesehen näher liegender Stern ganz dicht vor einer solchen »Lampe« vorbeizieht, dann fokussiert die Schwerkraft des vorderen Sterns das Licht des hinteren so in un-



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BÜSKE-GRAFIK

sere Richtung, dass dessen Helligkeit charakteristisch schwankt: Erst steigt sie auf ganz bestimmte Weise an, erreicht ein Maximum und fällt dann symmetrisch wieder ab (siehe Grafik S. 16).

Falls nun ein Planet den Vordergrundstern begleitet, kann er – bei günstiger Geometrie – in der Lichtkurve eine zusätzliche Schwankung erzeugen. Allerdings ist die Wahrscheinlichkeit generell äußerst gering, dass ein Stern von uns aus gesehen so nah vor

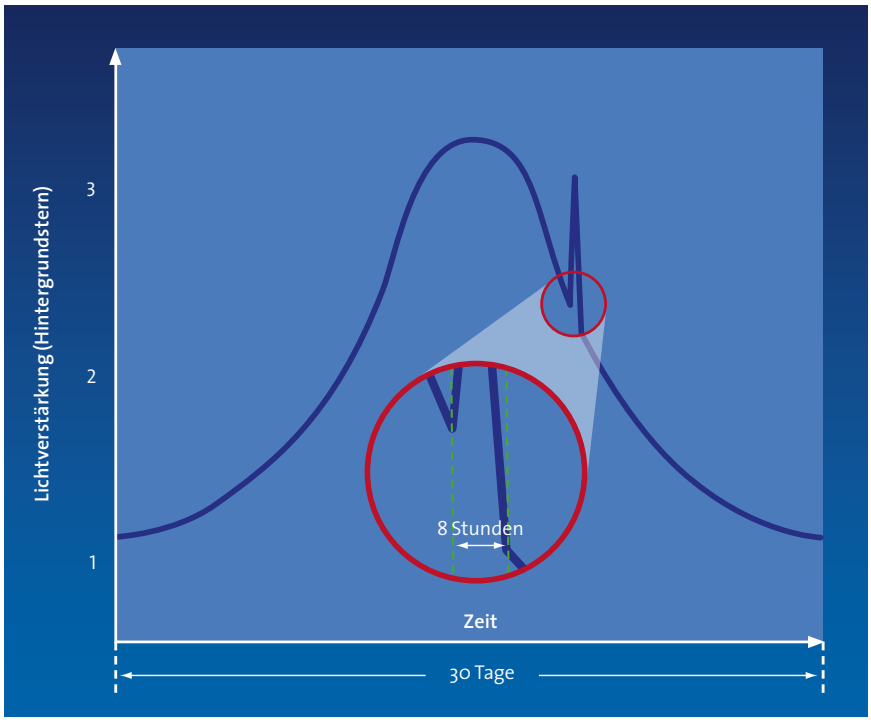
Sobald sich ein Stern (weiß) zwischen Erde und einen Hintergrundstern schiebt, verzerrt das Schwerefeld dieses »Linsensterns« das vom Hintergrundstern kommende Licht. So können mehrere Abbilder entstehen. Gegebenenfalls werden diese zusätzlich vom winzigen Gravitationsfeld eines Planeten moduliert.

ANZEIGE

Courses and Conferences
EMBL
2012
Morphogenesis
Systems Biology
Microfluidics
C. elegans
Proteomics
Stem Cells
Drug Discovery
Chemical Biology
Bioinformatics
Discover more!
Microscopy & Imaging
Data Analysis
Germline
Diabetes and Obesity
Functional Genomics
Structural Biology
Transcription and Chromatin
European Molecular Biology Laboratory
www.embl.org/events
EMBL

einem Hintergrundstern vorbeiläuft, dass dessen Licht deutlich verstärkt wird. Rund eine Million Sterne müssen wir durchmustern, um durchschnittlich eines dieser Ereignisse aufzuspüren. Und es gibt eine weitere Einschränkung: Selbst wenn alle beobachteten »Linsensterne« von Planeten umkreist würden, ließe sich die Planetensignatur in nur weniger als einem Prozent der Mikrolinsenlichtkurven beobachten.

Eigentlich erscheint diese Methode also ziemlich aussichtslos. Aber es ist wie beim Lotto – auch da ist die Chance, sechs Richtige plus Superzahl zu erreichen, kleiner als 1:100 Millionen. Und dennoch tritt das fast jeden Monat mehrmals ein: Bei 100 Millionen ausgefüllten Kästchen pro Woche ist die Erfolgschance eben doch nicht mehr so gering. Genauso machen das auch die Astronomen – und entdecken dadurch immerhin etwa 1000 stellare Mikrolinsenereignisse pro Jahr.



Der Gravitationslinseneffekt kann das Licht eines Hintergrundsterns für viele Tage verstärken, wenn ein Stern im Vordergrund, der »Linsenstern«, die Sichtlinie kreuzt (dunkelblaue Kurve). Umkreist dann noch ein Planet den Linsenstern, zeigt sich im Helligkeitsverlauf einige Stunden lang zusätzlich eine charakteristische Spitze.

100 Millionen Sterne pro Woche

Die Suche nach den planetaren Mikrolinsenlichtkurven läuft in zwei Stufen ab: Ein so genanntes Survey-Team vermisst mehrmals pro Woche etwa 100 Millionen Sterne. Nimmt die Helligkeit eines Sterns auf die erwartete typische Weise zu, gehen die Beobachter von einem stellaren Mikrolinsenereignis aus und geben diesen Kandidaten unverzüglich bekannt. Eine andere Gruppe von Wissenschaftlern, das Follow-up-Team, konzentriert sich nur auf solche bereits angelaufenen Mikrolinsenlichtkurven und misst diese viele Male, idealerweise alle paar Minuten. So lässt sich selbst eine sehr kurz andauernde Abweichung von der normalen stellaren Lichtkurve nachweisen, wie sie eben die Signatur eines Planeten darstellt. Auf diese Weise wurden insgesamt schon rund zwei Dutzend Planeten aufgespürt.

Für unsere »Nature«-Veröffentlichung identifizierte das Survey-Team OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment) als erste Stufe von 2002 bis 2007 rund 3000 stellare Mikrolinsenlichtkurven kurz nach Beginn der Lichtverstärkung. Das Follow-up-Team PLANET (dem der Autor angehört) hat davon eine Auswahl von einigen hundert mit hoher zeitlicher Genauigkeit vermessen und so drei Exoplaneten entdeckt.

Um nun daraus Schlüsse auf die Gesamtpopulation der Planeten in der Milchstraße ziehen zu können, musste der zweistufige Survey- und Follow-up-Prozess im Computer präzise imitiert werden. Die Simulation betrachtete Linsensterne mit Planeten unterschiedlicher Massen – im Bereich von fünf Erdmassen bis zu zehn Jupitermassen – und verschiedener Abstände (entsprechend etwa Venus- bis Saturnbahn). Ergebnis der aufwändigen Berechnungen: Wenn alle Sterne in der Milchstraße einen Planeten im genannten Masse- und Abstandsbereich haben, hätte man in den vorliegenden Daten etwa zwei Exoplanetenentdeckungen erwartet.

Nachgewiesen wurden aber sogar drei. Nach präziser Analyse schlossen wir daraus, dass jeder Stern der Milchstraße im Durchschnitt 1,6 Planeten im untersuchten Massen- und Abstandsbereich hat. Damit ist klar: Planeten sind die Regel und nicht die Ausnahme! Einen großen Teil der Arbeit leistete Arnaud Cassan, Erstautor der »Nature«-Publikation und inzwischen am Institut d'Astrophysique de Paris tätig, während seiner Zeit als Postdoctoral Fellow am Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg.

Man könnte nun fragen, wie Astronomen nach der Entdeckung von nur drei Exoplaneten behaupten können, alle Sterne der Milchstraße hätten durchschnittlich mindestens einen Planeten. Dies ist aber in der Tat ein sehr zuverlässiges Resultat. Ich will es mit einer Analogie veranschaulichen. Laut Wikipedia gibt es in Deutschland 2063

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de

Unsere Themenseite »Exoplaneten« finden Sie unter www.spektrum.de/exoplaneten

Städte. Meine Frage lautet nun: Glauben Sie, dass es in jeder deutschen Stadt im Schnitt mindestens eine Kirche gibt? Nach kurzem Überlegen würden wohl fast alle Leser zustimmen. Meine nächste Frage betrifft nun den direkten Nachweis: In wie vielen Städten haben Sie dies bereits persönlich überprüft? Diese Antwort kommt vermutlich etwas zögerlicher, die meisten werden wohl Zahlen zwischen 10 und 50 nennen. Trotz dieser kleinen Zahl von direkten Nachweisen schließen alle Befragten zu Recht, dass in jeder Stadt Deutschlands durchschnittlich mindestens eine Kirche steht.

Wo wir Planeten entdecken konnten, fanden wir auch welche

Die Grundlage für diese eigentlich gewagte Schlussfolgerung: In jeder Stadt, in der Sie in der Lage waren, eine Kirche zu entdecken (weil Sie dort waren und lange genug herumspazierten, weil die Kirche direkt neben dem Bahnhof stand, weil Sie dort heirateten …), haben Sie tatsächlich eine Kirche gesehen. Und auf ganz ähnliche Weise schlussfolgern Astronomen: Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen sagen uns, dass wir mit unseren Beobachtungen zwei Planeten hätten finden sollen. Und wir haben sogar drei entdeckt. Das heißt statistisch gesprochen: Bei jedem Stern, bei dem wir in der Lage waren, einen Planeten zu entdecken, haben wir einen gefunden.

Neben diesem Hauptergebnis konnten wir – unter Hinzuziehung von sieben weiteren in einer erweiterten Durchmusterung mit dem Mikrolinseneffekt nachgewiesenen Exoplaneten – sogar eine Aussage über die Häufigkeit von Planeten als Funktion ihrer Masse treffen. Unter diesen zehn Planeten war etwa die Hälfte »massereich« (in der Masse dem Jupiter ähnlich), die andere Hälfte massearm (»neptunähnlich«). Daraus konnten wir schließen: Planeten mit kleineren Massen treten häufiger auf als andere. Während laut unseren Abschätzungen nur etwa jeder sechste Stern von einem jupiterähnlichen Planeten umkreist wird, sind neptunähnliche Planeten (mit gerade fünf Prozent der Jupitermasse, entsprechend 18 Erdmassen) bereits um jeden dritten Stern zu erwarten, so genannte Super-Erden mit etwa fünf Erdmassen kreisen wohl gar um 70 Prozent aller Sterne. Für noch kleinere Massen waren unsere Messungen nicht empfindlich genug. Aber die Vermutung liegt nahe, dass Planeten mit näherungsweise Erdmasse noch häufiger auftreten sollten – so wie es auch im Sonnensystem der Fall ist.

Wie aber lässt sich mit nur zehn Planeten sogar ihre Massenverteilung derart genau ableiten? Die Antwort lautet: Mit allen genannten Suchverfahren sind große und massereiche Exoplaneten leichter aufzuspüren als kleine und massearme. Das gilt auch für die Gravitationslinsenmethode. Allerdings ist beim Microlensing die Abhängigkeit von der Masse der Begleitkörper geringer als bei anderen Methoden. Ihre untere Nachweisgrenze liegt inzwischen bereits im Bereich einer Erdmasse. Dennoch mag die Aussage gewagt klingen, dass – auf der Basis von fünf massereichen und fünf massearmen Planeten – die letzteren sehr viel häufiger sein sollen als erstere.

Ich will auch diese Schlussfolgerung mit einem Beispiel veranschaulichen. Angenommen ein Fischer hat ein Netz mit einer Maschengröße von fünf Zentimetern. In ihm findet er fünf Fische mit einer Dicke von deutlich mehr als fünf Zentimetern (die Länge ist hier nicht so entscheidend) sowie weitere fünf Fische, die nur ein bis drei Zentimeter messen. Da die meisten Fische dieser Größe ihm zweifellos durch die Maschen gegangen sind, er aber gleichwohl genau so viele kleine wie große Fische gefangen hat, kann er mit ziemlicher Sicherheit sagen, dass kleine Fische häufiger vorkommen müssen als große. Genau so können wir aus unseren fünf massearmen und fünf massereichen Planeten schließen, dass massearme Exoplaneten sehr viel häufiger vorkommen sollten als massereiche.

Joachim Wambsganß ist Direktor des Zentrums für Astronomie der Universität Heidelberg (ZAH).

Natur
Energie
Plus

Mit der Natur auf einer Welle.

In den letzten zwölf Monaten haben sich über 30.000 Bürger für Strom aus 100 % Wasserkraft von NaturEnergiePlus entschieden. Wann wechseln Sie zum Strom aus sauberer Quelle?

→ Jetzt wechseln!

www.naturenergieplus.de

BIOCHEMIE

Proteinstrukturen vorhersagen – dank Verwandtschaftsbeziehungen

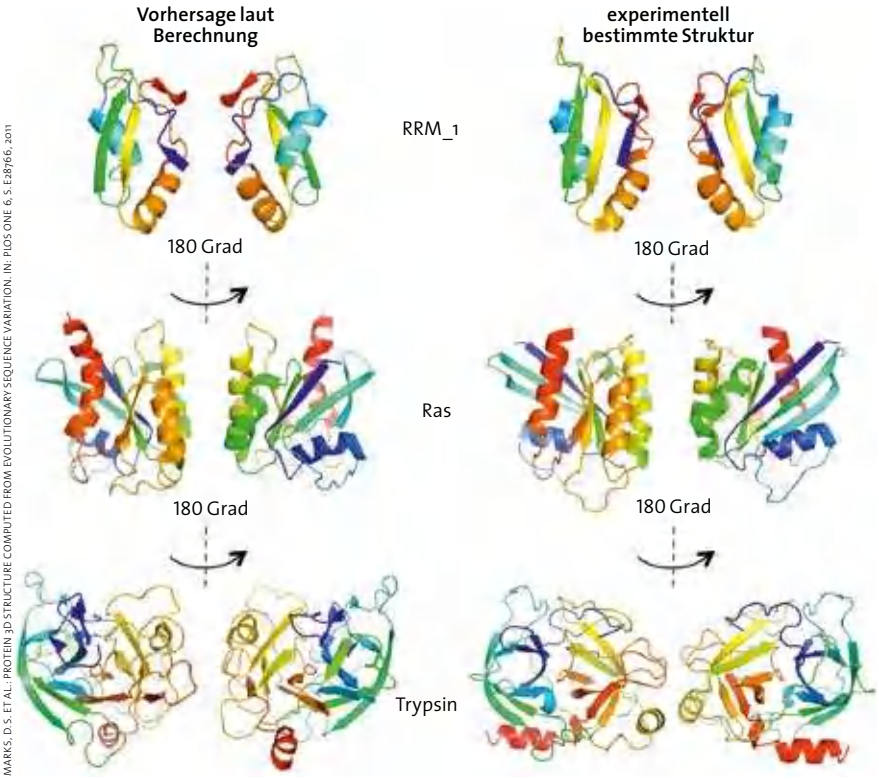
Die dreidimensionale Struktur eines Proteins ist durch die Abfolge der einzelnen Aminosäuren eindeutig festgelegt. Trotzdem fällt es Forschern immer noch schwer, sie zu berechnen. Vergleiche zwischen verwandten Eiweißstoffen können helfen.

VON MICHAEL GROSS

Proteine entstehen als lange Ketten aus Aminosäuren. Innerhalb von weniger als einer Sekunde faltet sich ein neu hergestelltes Molekül dann zu einer genau definierten räumlichen Gestalt. Dabei ist Letztere bereits durch die Abfolge der Aminosäuren festgelegt. Eigentlich müsste man die korrekte 3-D-Struktur also aus der DNA-Sequenz mit Hilfe von Computerprogrammen vorhersagen können, statt sie wie bisher mühsam experimentell zu ermitteln – wenn sich nur der zu Grunde liegende Kode leichter knacken ließe.

Eine wichtige Rolle spielen solche Strukturvorhersagen zum Beispiel bei der Medikamentenentwicklung – wenn es etwa darum geht, passgenaue Hemmstoffe für Rezeptoren in der Zellmembran zu entwickeln. Daher treibt das Problem die Proteinforscher schon seit Jahrzehnten um. Seit 1994 gibt es sogar im Zwei-Jahres-Rhythmus einen Wettbewerb dazu namens CASP (critical assessment of protein structure predictions). Doch bisher lässt sich nur bei sehr kleinen Proteinen die Struktur allein aus der Sequenz vorhersagen. Schon Moleküle von rund 100 Aminosäuren überfordern die Fähigkeiten selbst der besten verfügbaren Computerprogramme bei Weitem – es gibt einfach zu viele Möglichkeiten der räumlichen Anordnung.

In den letzten Jahren hat sich die Kluft zwischen der Zahl der bekannten Aminosäuresequenzen und jener der ermittelten Strukturen sogar noch stark vergrößert. Das liegt nicht etwa daran, dass die Biochemiker faul gewesen wären: Bei mehr als 80 000 Strukturen in der Protein Data Bank kann man ihnen das wirklich nicht vorwerfen. Doch hat die Sequenziertechnologie zur Entschlüsselung von Genen und Genomen seit 2005 einen derart gigantischen Sprung vorwärts gemacht, dass sich die Analysekosten für ein menschliches Genom um sechs Zehnerpotenzen (also ungefähr millionenfach) reduzierten. Dementsprechend explodierte gerade-



MARKS, D. S. ET AL.: PROTEIN 3D STRUCTURE COMPUTED FROM EVOLUTIONARY SEQUENCE VARIATION. IN: PLOS ONE 6, S. E28766, 2011

Die räumliche Struktur von Proteinen lässt sich durch Vergleich verwandter Aminosäuresequenzen vorhersagen. Im Bild sind die derart berechneten (links) Formen dreier Eiweiße (RRM_1, Ras und Trypsin) den jeweiligen experimentell bestimmten (rechts) gegenübergestellt. Die beste Übereinstimmung findet sich beim Ras-Protein (mittlere Zeile). In den Grafiken stellen gedrehte Bänder so genannte Alpha-Helix-Strukturen dar. Die breiten Pfeile stehen für Beta-Faltblattstrukturen, wobei die Pfeilrichtung den Verlauf der Aminosäurekette vom N-Terminus zum C-Terminus anzeigt. Diese Richtung lässt sich auch an der Färbung erkennen: von Blau über Grün und Gelb bis zu Rot.

zu die Zahl der Gensequenzen in den Datenbanken, zu denen es noch keine Proteinstruktur gibt.

Auch die Entwicklung von gigantischen Supercomputern wie Blue Gene hat das Problem nicht gelöst. Somit ist die Bahn frei für unkonventionelle Lösungsvorschläge. Die Arbeitsgruppe von David Baker an der University of Washington in Seattle hat zum Beispiel ein Onlinespiel namens Foldit entwickelt, bei dem Mitspieler selbst ohne biochemische Vorkenntnisse der Proteinfaltung per Hand auf die Sprünge helfen können (siehe Spektrum der Wissenschaft 10/2010, S. 16).

Jetzt hat eine Forschergruppe einen neuen Ansatz entdeckt, der die Strukturentschlüsselung zukünftig wesentlich erleichtern könnte. Unter den Millionen von DNA-Sequenzen in den Datenbanken finden sich nämlich auch viele einander entsprechende Gene von verschiedenen Arten. Die zugehörigen Proteine sind also verwandt und weisen vermutlich eine sehr ähnliche Struktur auf, da sie vergleichbare Aufgaben erfüllen dürften. Entsprechend kann man davon ausgehen: Auch wenn sich die Aminosäureabfolge an einer Stelle änderte, blieb die räumliche Gestalt im Lauf der Evolution bewahrt.

Die Evolutionsgeschichte gibt Hinweise auf die Proteingestalt

Dies ist etwa dadurch möglich, dass an einer zweiten Stelle eine weitere Aminosäure getauscht wird, was die Auswirkungen der ersten Änderung auf die Proteinstruktur kompensiert. Angenommen, solche korrelierten Mutationen finden sich bei mehreren verwandten Proteinen an denselben Positionen der Aminosäurekette: Dann lässt dies umgekehrt vermuten, dass die betroffenen Aminosäuren räumlich nahe beieinanderliegen und miteinander wechselwirken. Größere Gruppen verwandter Sequenzen könnten damit auf Grund ihrer Evolutionsgeschichte Hinweise auf die räumliche Struktur der Proteine geben.

Solche Beobachtungen haben Forscher bereits mehrfach als ergänzende Informationsquelle zur Strukturvorhersage hinzugezogen. Die ersten Berechnungen, die ausschließlich auf solchen Verwandtschaftsstudien beruhen, veröffentlichte im Dezember 2011 die Arbeitsgruppe des deutschen Biophysikers Chris Sander am Memorial Sloan-Kettering Cancer Center in New York zusammen mit den Harvard-Forscherinnen Debora Marks and Lucy Colwell und Physikern in Italien *(PLoS One 2011, 6, e28766)*. Die Vorgehensweise bestand darin, auf der Grundlage kompensierender Mutationen Grenzwerte für die Abstände zwischen bestimmten Paaren von Aminosäuren zu berechnen.

Für jedes der untersuchten Proteine verwendeten die Forscher mindestens 1000 miteinander verwandte Sequenzen – in einigen Fällen sogar mehr als 10 000. Die Machbarkeit des Verfah-

www.spektrum.de/aboplus

Der Premiumbereich – exklusiv für Abonnenten von **Spektrum der Wissenschaft**

SDW ABOPLUS

Abonnenten von **Spektrum der Wissenschaft** profitieren nicht nur von besonders günstigen Abokonditionen, exklusiv auf sie warten unter www.spektrum.de/aboplus auch eine ganze Reihe weiterer hochwertiger Inhalte und Angebote, unter anderem:

- Alle **Spektrum der Wissenschaft**-Artikel seit 1993 im Volltext
- Ein Mitgliedsausweis, dessen Inhaber in zahlreichen Museen und wissenschaftlichen Einrichtungen ermäßigten Eintritt erhält
- Vergünstigte Sonderhefte, kostenlose Downloads und das Produkt des Monats zum Spezialpreis
- Einen Preisnachlass beim Bezug von Spektrum.de-Premium, mit unserer wöchentlichen Digitalzeitung »Die Woche«

Produkt des Monats

Spektrum DER WISSENSCHAFT Wissenschaft aus erster Hand

www.spektrum.de/aboplus

Denken heißt Zweifeln

Glaube und Vernunft vertragen sich schlecht.

Einmal kam meine Tochter verwirrt aus der Schule. In Religion waren Glaubenssätze durchgenommen worden, und der Lehrer hatte eingeräumt, dass Kirchenglaube und Wissenschaft in Konflikt geraten können. Dabei hatte er jedoch Religion und Naturforschung auf eine Stufe gestellt, indem er behauptete, auch Wissenschaft beruhe auf Glauben. Ein Physiker vertraue auf das Gesetz der Schwerkraft, wie ein Christ an Gott glaube. Meine Tochter hatte an dieser Gleichsetzung Zweifel geäußert, war damit aber schlecht angekommen.

In der Tat erheben Naturwissenschaftler und Theologen gleichermaßen den Anspruch auf Wahrheit. Mithin stellt sich die Frage: Gibt es überhaupt einen spezifischen Unterschied zwischen Religiosität und wissenschaftlicher Methodik – oder sind das bloß unterschiedliche, aber gleichwertige Arten, sich die Welt zurechtzulegen? Wie vertragen sich Glaube und logisches Denken?

Anscheinend ist diese Frage erst kürzlich zum ersten Mal empirisch untersucht worden. Die Psychologen Will M. Gervais und Ara Norenzayan von der University of British Columbia in Vancouver (Kanada) stellten hunderte Studenten vor unterschiedliche Aufgaben, die analytisches Denken erfordern, und erhoben anschließend durch Testfragen die Tiefe ihrer religiösen Überzeugungen. Dabei ergab sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen Denkschärfe und Unglauben *(Science 336, S. 493, 2012)*. Beispielsweise lautete eine Frage: Ein Schläger und ein Ball kosten zusammen 1,10 Euro; der Schläger ist 1 Euro teurer als der Ball; wie viel kostet der Ball? Wer die intuitive, aber falsche Antwort »10 Cent« gab, erwies sich tendenziell auch als gottgläubig. Die Zweifler nannten im Durchschnitt dagegen eher die analytisch richtige Antwort »5 Cent«.

Die übrigen Testserien bewiesen, dass das keinesfalls heißt, religiöse Menschen seien irgendwie dümmer. Vielmehr scheint die Neigung – ja allein schon die Ermunterung – zu analytischem Denken quasi automatisch eine stärker zweifelnde Einstellung zu religiösen Fragen zu begünstigen. So sorgte das bloße Betrachten des berühmten »Denkers« von Rodin bei den Versuchspersonen für eine diesseitigere Haltung als der Anblick einer neutralen Skulptur, etwa des antiken Diskuswerfers: Anschließend stimmten die Probanden religiösen Sätzen wie »Ich glaube an Gott« oder »Den Teufel gibt es« deutlich seltener zu.

Der Befund passt gut zu der These des amerikanischen Psychologen Pascal Boyer, die religiöse Grundhaltung sei intuitiv naheliegend, entspreche sozusagen einer »natürlichen« Voreinstellung *(Nature 455, S. 1038, 2008)*. Wir müssen uns anstrengen und gleichsam mit analytischer Skepsis gegen einen Strom intuitiver Überzeugungen anschwimmen, um zu dem Schluss zu gelangen, dass sich im Körper keine übernatürliche Seele verbirgt, dass die Vielfalt biologischer Arten nicht auf separaten göttlichen Schöpfungsakten beruht und dass die Natur nicht einem Uhrwerk gleicht, für das es einen Uhrmacher geben muss.

Die kanadische Untersuchung hat den religiösen Glauben keineswegs als haltlose Weltsicht entlarvt. Sie scheint mir aber zu demonstrieren, dass ein problemloses, friedliches Nebeneinander von rationalem Denken und Jenseitsglauben ein frommer Wunsch bleiben muss. Ein intellektuelles Wagnis ist der Glaube allemal, stets bedroht vom denkerischen Zweifel. Dem Risiko, bezweifelt – und gegebenenfalls widerlegt – zu werden, sind freilich wissenschaftliche Resultate routinemäßig ausgesetzt. Zu ihrem Wesen gehört die Überraschung durch Empirie.

Michael Springer

rens prüften sie bei Proteinfamilien, von denen schon eine Struktur bekannt war. Damit ließ sich dann die Berechnung zwecks Kontrolle vergleichen. Ein wichtiges Problem ist, dass man zunächst viele Scheinkorrelationen erhält – also Paare von ausgetauschten Aminosäuren, die aber nicht räumlich benachbart sind. Um solche falschen Resultate auszuschließen, galt es, die komplexen mathematischen Verfahren feinfühlig anzupassen.

Probelauf bestanden

Das erlaubte es schließlich, bei mehreren der untersuchten Proteinfamilien eine im Wesentlichen korrekte Raumstruktur zu errechnen. Zum Beispiel konnten die Forscher mit der neuen Methode die Struktur des Ras-Proteins präzise bestimmen. Der hier untersuchte wasserlösliche Teil des Proteins, das eine wichtige Rolle in der Krebsforschung spielt, besteht aus 161 Aminosäuren und wäre damit für eine Strukturvorhersage mit den heute gängigen Programmen viel zu groß. Die Atompositionen wichen im errechneten Modell nicht mehr als 0,35 Nanometer von den experimentell ermittelten Werten ab, und alle größeren Strukturelemente befanden sich an den richtigen Stellen (siehe Grafik S. 18).

Die Forscher wandten dasselbe Verfahren auch auf 14 andere Proteinfamilien an, mit Größen zwischen 48 und 258 Aminosäuren. Nicht alle Ergebnisse waren so gut wie das der Ras-Domäne – doch sie zeigten, dass sich die Proteinstruktur prinzipiell auf Grund von Verwandtschaftsverhältnissen vorhersagen lässt, wenn man nur genügend vergleichbare Sequenzen als Ausgangsmaterial hat. Umgekehrt mag die Erkenntnis, dass die Mutationsmuster bereits die nötige Information zur Ermittlung der Struktur enthalten können, auch für Evolutionsforscher aufschlussreich sein. Denn sie zeigt auf, wie die räumliche Gestalt der Proteine im Zuge der Stammesgeschichte vor schädlichen Veränderungen bewahrt wurde.

Michael Groß ist Biochemiker und freier Wissenschaftsjournalist in Oxford, England.

Ein Leben mit Diabetes. Kein Problem!

Medizinthemen spielen in FOCUS schon immer eine zentrale Rolle. In FOCUS-GESUNDHEIT bündeln wir die große Erfahrung unserer Fachredaktion mit der Kompetenz von Experten. Die aktuelle Ausgabe bringt Sie auf den neuesten Stand zum Thema Diabetes. Sie erklärt, wie die Krankheit genau entsteht, sagt, wie Sie am besten vorbeugen, und zeigt die neuesten Therapien.

Themen in diesem Heft:

- **Wie Diabetes entsteht:** Wer wird krank? Wer bleibt gesund? Forscher klären auf. Mit Selbst-Test.
- **Diabetes heilen:** Ob bei Typ 1 oder Typ 2 – Zukunftstechnologien machen Hoffnung.
- **Leben mit Diabetes:** Essen ohne Verzicht. Experten berichten, wie es geht.

Jetzt am Kiosk.

FOCUS-GESUNDHEIT gibt es auch unter: Tel. 0180 5 480 1000*, Fax 0180 5 480 1001*, www.focus-gesundheit.de

*€ 0,14/Min. aus dem dt. Festnetz. Aus dem Mobilnetz max. € 0,42/Min.

Wie sich das Ungeborene vor der Mutter schützt

Eigentlich ist das Kind für die Schwangere ein Fremdkörper. Aber der Fötus selbst sorgt dafür, dass ihr Immunsystem ihn nicht angreift. Dazu bildet das Kind von Anfang an besondere Signalfaktoren aus.

Von Edgardo D. Carosella und Nathalie Rouas-Freiss

»Eine gute Ehe besteht dann, wenn beide Partner das Glück haben, das Unerträgliche tolerieren zu können.« So schrieb 1939 der französische Schriftsteller und Biologe Jean Rostand (1894–1977) in seinem Buch »Pensées d'un biologiste« (Gedanken eines Biologen). Gleiches ließe sich zur Schwangerschaft sagen. Denn obwohl sich Mutter und Kind immunologisch unterscheiden, gelingt es ihnen, sich zu tolerieren. Wesentlich tragen dazu Signalmoleküle des Kindes in der Plazenta bei, die unser Forschungsteam am l'Hopital Saint-Louis in Paris vor gut 20 Jahren entdeckte.

Die meisten Zellen des Körpers haben auf ihrer Oberfläche individuelle Erkennungsmerkmale – so genannte Antigene –, die von Varianten im Erbgut abhängen. Es gibt verschiedene Typen solcher Signaturen. So bestimmen etwa Oberflächenmarker auf den roten Blutkörperchen die Blutgruppe. Unterschiede darin bei Mutter und Kind können unter Umständen Schwierigkeiten machen, etwa beim Rhesusfaktor. Die weißen Blutkörperchen tragen ebenfalls Antigene, und zwar so genannte humane Leukozytenantigene, abgekürzt HLA. Dieser äußerst variablen Gruppe bedienen sich auch andere Körperzellen. Es handelt sich um Moleküle, die in einer besonderen genetischen Region kodiert sind. Da sie die Gewebeverträglichkeit bei Transplantationen vorgeben, sprechen Wissenschaftler auch von Gewebeverträglichkeits- oder Histokompatibilitätsantigenen. Das von uns entdeckte Signalmolekül – das auf den meisten Körperzellen gewöhnlich nicht vorkommt – zählt gleichfalls zu dieser Gruppe. Es wird als HLA-G klassifiziert.

Das so genannte HLA-System beschrieb als Erster 1958 der französische Immunologe Jean B. G. Dausset (1916–2009), der 1980 zusammen mit zwei anderen Forschern den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin bekam. Es ist sehr viel komplexer als das Blutgruppensystem. Seine Gene – und die entsprechenden Proteine – werden nach ihrer Funktion bei der Immunabwehr in zwei Klassen unterteilt. Die Moleküle der Klasse I sitzen auf fast allen Körperzellen und kodieren für die Antigene A, B und C (also HLA-A etc.). Die Gene der Klasse II bestimmen drei Gruppen von Antigenen, zusammen HLA-D genannt: HLA-DR, -DP und -DQ. Diese Antigene finden sich auf Immunzellen, den weißen Blutkörperchen. Jedes der *HLA*-Gene kommt in derart vielen Varianten vor, dass die Kombinationsmöglichkeiten zugehöriger Antigene die derzeitige Zahl der Menschen auf der Welt um das Zweieinhalbfache übersteigen. Und zwar prägt jedes Individuum auf den meisten seiner Zellen normalerweise 14 verschiedene HLA-Moleküle aus, die sich nur bei eineiigen Zwillingen gleichen. Von denen stammen sieben von der Mutter und sieben vom Vater.

Immunologisch betrachtet stellt der Fötus darum für die Mutter ein zur Hälfte inkompatibles Transplantat dar – mit ebenso vielen Antigenen von mütterlicher wie von väterlicher Seite. Tatsächlich vermag das Immunsystem der Mutter die fremden, vom Vater stammenden Moleküle zu erkennen: Übertrüge man ihr nach der Entbindung ein Organ oder Gewebe ihres Kindes, so würde sie den Fremdkörper sofort

AUF EINEN BLICK

IMMUNTOLERANZ UND SCHWANGERSCHAFT

1 Der Embryo umgibt sich gleich nach der Befruchtung des Eis mit einem Gewebe – dem **Trophoblasten** –, das später auch die Plazenta bildet und mit den Zellen der Mutter **immunologisch inkompatibel** ist. Denn ein Teil der Oberflächenmarker auf den embryonalen Zellen stammt von väterlichen Genen.

2 Doch die natürlichen Killerzellen der Mutter greifen die kindlichen Zellen nicht an, sondern dulden sie. Diese **Toleranz** bewirken Proteine auf den embryonalen Zellen, die zu den **Histokompatibilitätsantigenen** zählen und **HLA-G** genannt werden. Für die Einnistung des Embryos und einen komplikationslosen Schwangerschaftsverlauf sind diese Proteine unverzichtbar.

3 HLA-G spielt auch bei manchen **Immunkrankheiten**, bei **Krebs** und bei **Transplantationen** eine Rolle. Es handelt sich um wesentliche Moleküle für immunologische Toleranz.

abstoßen. Doch während der Schwangerschaft geschieht dergleichen normalerweise nicht einmal ansatzweise.

Umgekehrt muss natürlich das Ungeborene Antigene der Mutter tolerieren, denn einige ihrer Zellen gelangen in seinen Organismus. Allerdings ist sein Immunsystem zunächst noch so unreif, dass ihm die mütterlichen Zellen anfangs nicht fremd vorkommen. Und später bilden sich offenbar entsprechende Toleranzmechanismen heraus. Doch in diesem Artikel soll nur die andere Seite interessieren: wieso das mütterliche Immunsystem den Fötus toleriert.

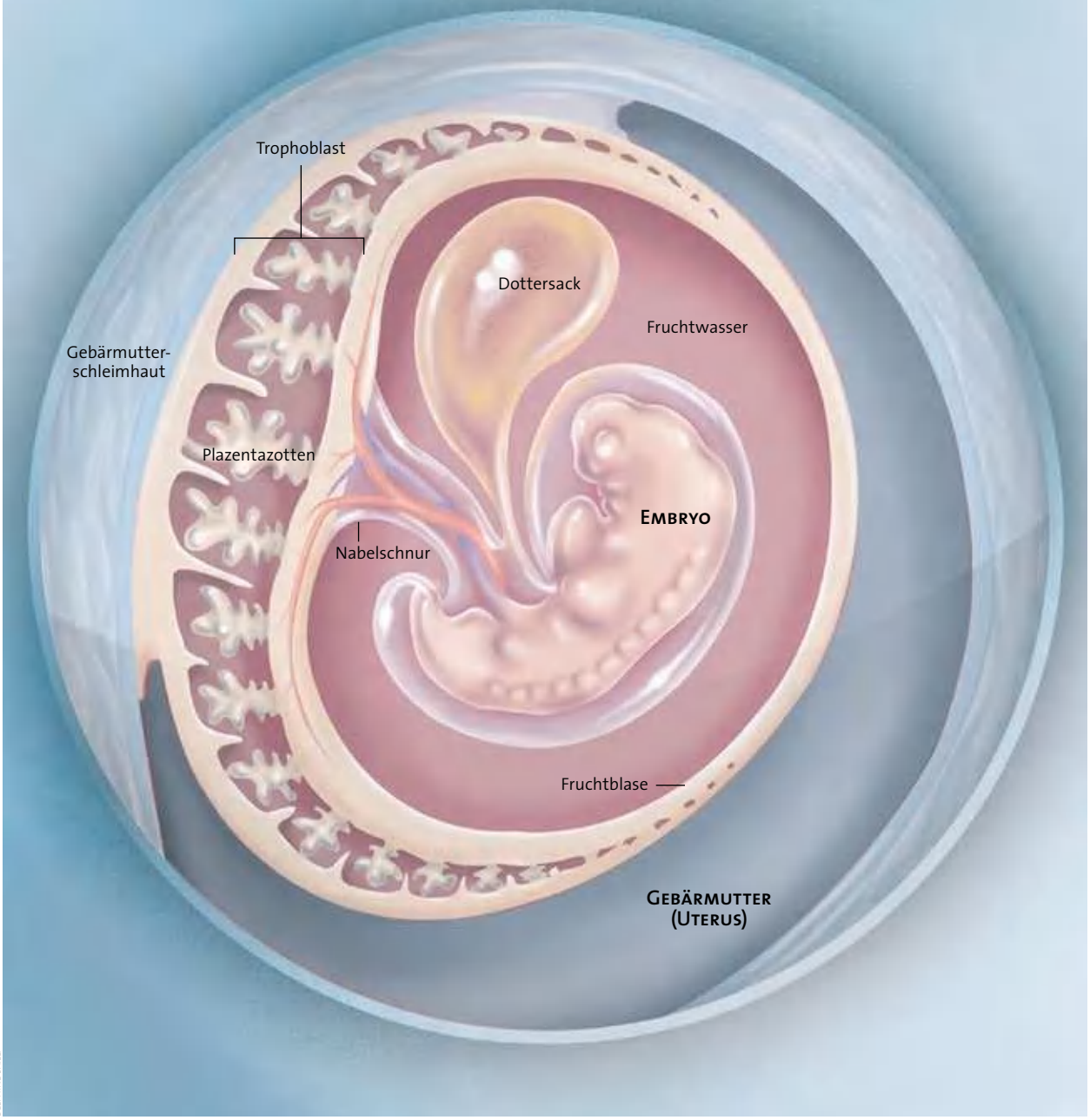
Gleich in den ersten Tagen der Schwangerschaft produziert der Embryo aus eigenen Zellen den Trophoblasten – eine »Nährschicht«, die ihn umschließt. Diese differenziert sich bald zur Plazenta, die über eine spezielle Schicht miteinander verschmolzener embryonaler Zellen in direktem Kontakt mit der Schleimhaut der Gebärmutter steht, in die sich der Embryo einbettet (siehe Bild S. 24). Dort findet der Austausch von Sauerstoff und Kohlendioxid sowie Nähr- und Abfallstoffen zwischen mütterlichem und kindlichem Organismus statt. Gegen Ende des ersten Schwangerschaftsdrittels weist die Plazenta dafür ein reich verzweigtes Netz mütterlicher Blutgefäße auf, das an das dort entstehende embryonale Blutgefäßnetzwerk andockt. Obwohl die Plazenta den Fötus gegenüber dem mütterlichen Immunsystem weit gehend abschottet, gelangen dennoch einige Zellen der Mutter in seinen Blutkreislauf und umgekehrt.

Eine Schwangerschaft verlangt höchst komplexe molekulare Anpassungen von Mutter und Kind.

ISTOCKPHOTO / MAX DELSON MARTINS SANTOS

Ein Schutzschild mit vielen Aufgaben

Der Embryo bildet gleich nach der Befruchtung, bevor er sich in den Uterus einnistet, eine Schutz- und Nährschicht, den Trophoblasten. Daraus entwickelt sich später die Plazenta, die in direktem Kontakt und Austausch mit mütterlichen Zellen des Uterus steht. Embryonale (gelbrötlich dargestellte) und mütterliche (blaue) Gewebe müssen sich vertragen, obwohl sich ihre Immunmarker unterscheiden.



DELPHINE BALLY

Das Antigen HLA-G, welches das Kind schützt, entdeckten wir 1991 auf Zellen des Trophoblasten – als ein Produkt dieses Gewebes. Anders als die erwähnten schon länger bekannten »klassischen« HLA-Moleküle findet sich HLA-G normalerweise nur auf fötalen Zellen sowie auf den inneren Zellen der Fruchtblase und im Fruchtwasser, außerdem auf einigen Zellen der Thymusdrüse und der Augenhornhaut. In der Thymusdrüse reifen bestimmte Immunzellen heran und werden geschult, »selbst« und »fremd« zu unterscheiden. Zunächst wussten wir allerdings nicht, ob allein HLA-G die Toleranz der Mutter dem Fötus gegenüber bewirken kann. Dieser Nachweis gelang uns schließlich 1998.

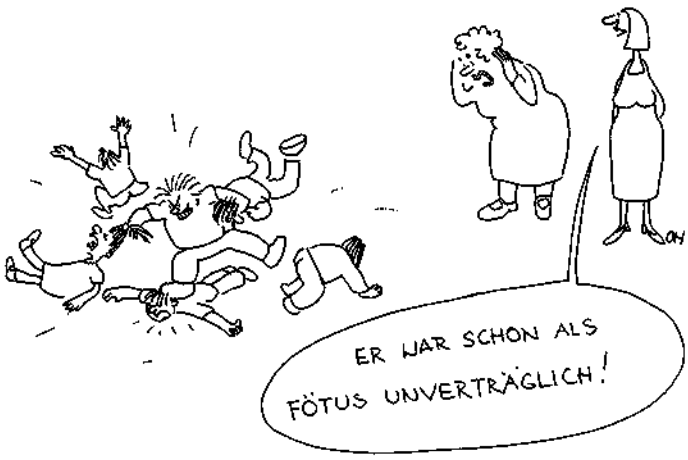
Generell unterscheiden Wissenschaftler zwischen humoraler und zellulärer Abwehr. Erstere benutzt Antikörper, die beim Kampf gegen Viren und Bakterien helfen, indem sie Merkmale der Erreger erkennen. Für unsere Fragestellung war jedoch die so genannte zelluläre Abwehr wichtig, denn sie greift schadhafte, kranke – etwa infizierte – und auch fremde Zellen an. Die Hauptrollen spielen hierbei zwei Typen von Immunzellen: die zytotoxischen T-Zellen und die natürlichen Killerzellen. Beide vernichten ihre Feinde, indem sie das Enzym Perforin freisetzen, das die äußere Zellmembran durchlöchert und eine unerwünschte Zelle somit zu Grunde richtet.

Killerzellen im Labortest

Zytotoxische T-Zellen machen in der im Brustraum liegenden Thymusdrüse einen Reifungsprozess durch, indem sie an den HLA-Markierungen der körpereigenen Zellen um sich herum quasi lernen, ebendiese Erkennungsmerkmale zu tolerieren. So auch die zytotoxischen T-Zellen einer Schwangeren, die im Uterus auftreten: Sie unterscheiden zwischen selbst und fremd. Das bedeutet, sie greifen nur Zellen mit ihnen fremden Markierungen an, etwa von Viren befallene oder Tumorzellen. Nun tragen die fötalen Zellen des Trophoblasten allerdings keine klassischen HLA-Moleküle, abgesehen von ein wenig HLA-C ab der sechsten Schwangerschaftswoche. Deswegen lassen die zytotoxischen T-Zellen der Mutter sie in Ruhe.

Ihre natürlichen Killerzellen reagieren hingegen gerade auf Zellen ohne klassische HLA-Moleküle. Die Zellen des Trophoblasten wären für sie somit eigentlich ein hervorragendes Angriffsziel. Da natürliche Killerzellen in der Gebärmutterschleimhaut in großer Anzahl patrouillieren, müssten sie das Trophoblastengewebe eigentlich angreifen – was aber gewöhnlich nicht geschieht. Um die Bedeutung von HLA-G in dem Zusammenhang zu ergründen, arbeiteten wir in mehreren Versuchsserien einerseits mit gezüchteten Zelllinien – im Laborjargon »in vitro« –, andererseits mit frischen Zellen von Fötus und Mutter, die von Schwangerschaftsabbrüchen stammten (»ex vivo«).

Zunächst brachten wir natürliche Killerzellen aus venösem Blut gesunder Personen mit gezüchteten menschlichen Zellen zusammen, die keinerlei HLA-Moleküle bildeten – auch kein HLA-G. Erwartungsgemäß zerstörten die Killerzellen diese Laborkulturen (siehe Bild S. 27, a). Als Nächstes verpassten wir den nackten Zelllinien ein Gen für HLA-G, so dass sie jenes Antigen nun herstellten und auch auf sich trugen. Diese Zellen wurden von den Immunzellen meistens nicht umgebracht (Bild S. 27, b). Je nach Herkunft der Killerzellen – sie stammten von verschiedenen Personen – blieben zwischen 78 und 95 Prozent der kultivierten Zellen am Leben. In einem weiteren Experiment behandelten wir HLA-G-markierte Zellen mit Antikörpern gegen dieses Antigen, um das Erkennungsmolekül zu blockieren. Jetzt waren unsere Kulturen den Angreifern wiederum hilflos ausgesetzt und gingen fast vollständig zu Grunde (Bild S. 27, c).



Offenbar verlieh das HLA-G in vitro tatsächlich einen Schutz. Aber leistet es das auch unter den sehr viel komplexeren Bedingungen einer Schwangerschaft? Hierzu untersuchten wir, wie sich natürliche Killerzellen der Mutter verhalten, die wir aus Gewebeproben von Schwangerschaftsabbrüchen gewannen – also aus (kindlichen) Trophoblasten und Gebärmutterschleimhaut, in der sie reichlich vorkommen. Diese mütterlichen Killerzellen testeten wir an ebenfalls frisch gewonnenen Trophoblastenzellen. Wie gesagt, weisen diese weder HLA-A noch -B und nur ganz wenig HLA-C auf und müssten von den Killerzellen deswegen eigentlich vernichtet werden. Aber die frischen Trophoblastenzellen blieben unversehrt.

Bald darauf konnten wir an frischen Gewebepräparaten zeigen, dass dieser Schutz vor den mütterlichen Killerzellen tatsächlich auf HLA-G zurückgeht, das die fötalen Zellen herstellen. Offenbar wirkt der Schutzschild hervorragend, denn sogar Killerzellen von fremden werdenden Müttern erwiesen sich gegen ihn als machtlos. Ebenso erprobten wir mit dem frischem Zellmaterial den Effekt von Antikörpern gegen HLA-G, und wirklich ging dann der Schutz verloren und die frisch gewonnenen Trophoblastenzellen fielen den mütterlichen Killerzellen zum Opfer.

Schließlich wollten wir noch wissen, ob den Trophoblastenzellen gegen mütterliche Immunangriffe vielleicht auch das bei ihnen in geringer Menge vorhandene Antigen HLA-C hilft. Dazu führten wir ähnliche Experimente wie zuvor mit HLA-G durch, nur diesmal mit gegen HLA-C gerichteten An-

tikörpern. Aber bei diesem Eingriff gewannen die mütterlichen Killerzellen ihre Zerstörungsmacht nicht zurück. Somit bewahrt tatsächlich nur das HLA-G die kindlichen Zellen vor Vernichtung.

Wir wissen inzwischen auch, wie dieses fötale Antigen die natürlichen Killerzellen der Mutter außer Gefecht setzt. Und zwar heftet es sich an bestimmte Proteine auf deren Oberfläche: die Rezeptoren ILT2, ILT4 und KIR2DL4. Vor allem letzterer findet sich auf den Killerzellen in der Gebärmutterschleimhaut. Wenn sich das Antigen daran anlagert, wird ein Signal in der Killerzelle blockiert, welches andernfalls Vesikel mit dem zerstörerischen Enzym Perforin an ihre Oberfläche zur Kontaktstelle der beiden Zellen schicken würde.

Übrigens tritt das Antigen HLA-G gleich vom Beginn der Schwangerschaft an in sieben Versionen oder Isoformen auf. Diese Spielarten rühren von nur einem Gen her: Genauer gesagt bilden die beiden Gene, die von Mutter und Vater stammen, die Vorlage für alle sieben Formen. Vier davon (HLA-G1 bis -G4) sind membrangebunden und bleiben auf der Zelloberfläche, die übrigen drei sind löslich und gelangen ins Blut des Fötus sowie ins Fruchtwasser. Die einzelnen Isoformen des Proteins entstehen auf Grund eines »alternatives Spleißen« genannten Vorgangs: Nachdem die DNA-Sequenz des Gens zunächst in Form von RNA kopiert wird, schneidet ein Enzymkomplex aus diesem RNA-Strang Teile heraus und fügt den Rest wieder zusammen. Das ergibt in diesem Fall Bauanleitungen für sieben recht verschiedene Proteine (siehe Kasten S. 28).

Sämtliche dieser HLA-G-Versionen schützen den Fötus vor dem mütterlichen Immunangriff, wie wir 2001 nachgewiesen haben. Die membrangebundenen Formen schaffen dort, wo sich der Embryo einnistet, eine Zone der Immuntoleranz. Die löslichen Versionen verteilen sich hingegen im fötalen Organismus und bewachen ihn als Ganzen. Wozu aber so viel Aufwand?

Absicherung durch Vielfalt

Der Hintergrund dafür könnte sein: Manche Föten produzieren wegen leicht veränderter Gene nicht alle HLA-G-Spielarten. So kommt es vor, dass jemand von beiden Eltern je eine »*Null*«-Genvariante für dieses Antigen geerbt hat, die eine Punktmutation aufweist – einen falschen Baustein im DNA-Strang. Diese Variante kodiert nicht mehr für HLA-G1, -G4 und -G5, wohl aber noch für die übrigen. Da es davon betroffene gesunde Kinder und Erwachsene gibt, haben die restlichen Antigenformen von HLA-G diese Menschen vor ihrer Geburt offensichtlich ausreichend beschützt. In Laborstudien fügten wir die *Null*-Variante in Zellen ein, die kein eigenes Gen für HLA-G besaßen. Daraufhin bildeten sie HLA-G2 und -G6. Das genügte ihnen im Experiment tatsächlich, um gegen natürliche Killerzellen gewappnet zu sein.

Die löslichen HLA-G-Formen sind zudem bereits für das Einnisten des Embryos in die Gebärmutterschleimhaut essenziell. Er bildet schon davor HLA-G-Proteine – auch dann, wenn das Ei in vitro befruchtet wurde. Die Immunologin Vera Rebmann von der Universität Essen wies 2010 mit ihrer Arbeitsgruppe in einer umfangreichen Studie nach: Die Aussichten dafür, dass sich ein außerhalb des Mutterleibs erzeugter Embryo einnistet und später keine Fehl- oder Frühgeburt erfolgt, hängen unter anderem davon ab, dass zunächst der Embryo und später der Fötus viel lösliches HLA-G bilden. Je mehr das Ungeborene von solchem HLA-G herstellt, umso wahrscheinlicher wird das Kind normal ausgetragen.

> Die Aussichten, sich einzunisten, hängen **bei in vitro gezeugten Embryonen** von der Menge an löslichem HLA-G ab

Nach all diesen Befunden gewährleisten insbesondere die HLA-G-Moleküle die Immuntoleranz der Mutter gegenüber dem Fötus. Wenn diese speziellen Antigene fehlen oder zu wenige vorhanden sind, stößt die Mutter das Kind ab – es gibt eine Fehlgeburt. Im Jahr 2000 untersuchten wir das Antigen im Zusammenhang mit Präeklampsie, einer gefährlichen Krankheit, an der viele Frauen in der Schwangerschaft leiden und die zu einer Fehl- oder Frühgeburt führen kann. Unter anderem äußert sie sich durch einen zu hohen Blutdruck und teils schwere Stoffwechsel- und Organstörungen bis hin zu Nierenversagen. Über die Ursache weiß man wenig. Allerdings fällt auf, dass die Plazenta zu wenig Blutgefäße enthält, wodurch sie – und damit auch das Kind – ungenügend mit mütterlichem Blut versorgt wird. Um den Mangel zu kompensieren, steigt der Blutdruck der Mutter, und ihren Organen wird Sauerstoff entzogen.

Wie stark sich das Blutgefäßnetz der Plazenta entwickelt, hängt davon ab, wie viele Zotten sie in der Gebärmutterschleimhaut ausbildet. Und das wiederum steht, wie wir zeigen konnten, sogar bei normalen Plazenten in Zusammenhang mit der Menge an HLA-G, die der Trophoblast produziert. Bei Präeklampsie ist nun ungewöhnlich wenig von dem Antigen vorhanden, und seine Isoform G3 fehlt vollständig – was beides übrigens nicht auf genetische Anomalien beim Kind zurückgeht.

Fehlgeburten können auch durch eine Infektion des Trophoblasten ausgelöst werden, zum Beispiel durch das Herpesvirus *Herpes simplex* oder das humane Zytomegalievirus. In beiden Fällen sind auf den fötalen Zellen keine HLA-G-Moleküle nachweisbar – weswegen die mütterlichen Immunzellen offenbar aktiv werden. Woran das liegt, ist inzwischen teilweise bekannt.

Proteine wie diese Antigene, die von der Zelle abgegeben oder in ihre Membran eingebaut werden, machen in einem verzweigten Membransystem im Innern von Zellen, dem so genannten endoplasmatischen Retikulum, zuerst noch eine Reifung durch. Erst danach werden die fertigen Proteine in kleinen Vesikeln an die Zelloberfläche transportiert. Genau diesen Transfer verhindert das Herpesvirus im Fall von

HLA-G: Es bildet ein Protein namens ICP47, welches ein an dem Transport beteiligtes Protein hemmt (siehe Bild S. 29). Das Zytomegalievirus verhindert in Trophoblasten den Export von HLA-G und -C gleich mit zwei Maßnahmen, die sich gegen beide Moleküle richten. Zum einen bindet sich eines seiner Proteine im endoplasmatischen Retikulum an diese Antigene und hält sie dort zurück. Zum anderen blockiert ein weiteres virales Protein die Verfrachtung zur Zelloberfläche. Auch manche anderen Erreger, selbst Parasiten, können eine Fehlgeburt herbeiführen, wenn ihretwegen auf den Trophoblastenzellen kein HLA-G auftaucht.

Ein Antigen zur Diagnose einer Schwangerschaft und ihrer Normalität

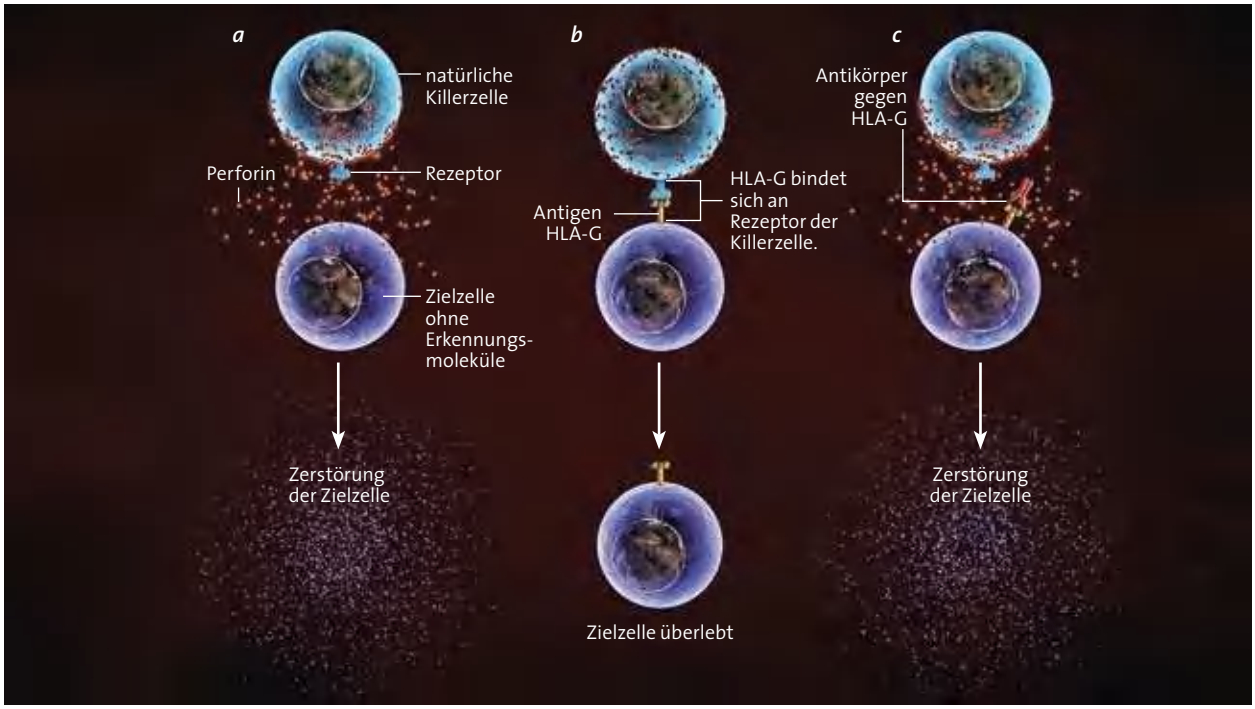
Die entscheidende Rolle dieses Antigens für die Schwangerschaft haben verschiedene Forscher in Tierstudien bestätigt. Spyros G. Dendrinos von der Universität Athen und seine Kollegen untersuchten transgene Mäuse, deren Embryonen menschliches HLA-G herstellen. Das Antigen ließ sich im Blutserum der Weibchen schon kurz nach einer Befruchtung nachweisen, und seine Konzentration stieg im Verlauf der Schwangerschaft an. Erhielten diese Weibchen das Antihormon Mifepriston – die »Abtreibungspille« RU486, die gegen das Schwangerschaftshormon Progesteron agiert –, fiel ihr Blutlevel an löslichem HLA-G sofort deutlich und sie hatten Fehlgeburten. Das Antigen scheint Studien zufolge ebenso beim Menschen von Anfang an anzuzeigen, ob eine Schwangerschaft vorliegt und ob sie gut verläuft.

Bei Rhesusaffen entspricht das Protein Mamu-AG stark dem menschlichen Antigen HLA-G, wie Thaddeus (Ted) G. Golos und seine Kollegen von der University of Wisconsin in Madison nachwiesen. Wenn sie dieses Affenantigen entweder mit Antikörpern blockierten oder von vornherein das Ablesen des zugehörigen Gens unterdrückten, reiften die Plazenta und die Blutgefäße an der Grenze zwischen mütterlichem und fötalem Gewebe nicht weiter, und das Blutgefäßnetz von Plazenta und Gebärmutterschleimhaut erlitt Schäden.

Außer die Schwangerschaft zu gewährleisten, haben die HLA-G-Proteine noch eine weitere Funktion: Sie ermöglichen es, dass einige wenige fötale Zellen ohne besondere Folgen in Blut und Gewebe der Mutter übertreten und dort erhalten bleiben – was umgekehrt beim Fötus ja auch geschieht. Fachleute sprechen von Mikrochimärismus. Wahrscheinlich besitzt jeder von uns ein paar fremde Zellen, zu-

Kein Überleben ohne HLA-G

Die embryonalen Zellen des Trophoblasten tragen keine klassischen Immunerkennungsmoleküle (Histokompatibilitätsantigene, abgekürzt auch HLA: humane Leukozytenantigene). Trotzdem werden sie von den natürlichen Killerzellen der mütterlichen Immunabwehr verschont, die Zellen ohne sie ausweisende Antigene sonst mit einem zellauflösenden Protein – Perforin – abtöten. Letzteres demonstrierten die Autoren mit »nackten« Zellen in einem Laborexperiment (a). Als sie die Zellen mit HLA-G-Molekülen ausstatteten, die für das embryonale Gewebe im Trophoblasten charakteristisch sind, blieben diese am Leben (b). Aber Antikörper, die HLA-G außer Gefecht setzen, heben den Schutz wieder auf (c).



GRÉGOIRE CIRADE, WWW.GREGCIRADE.COM

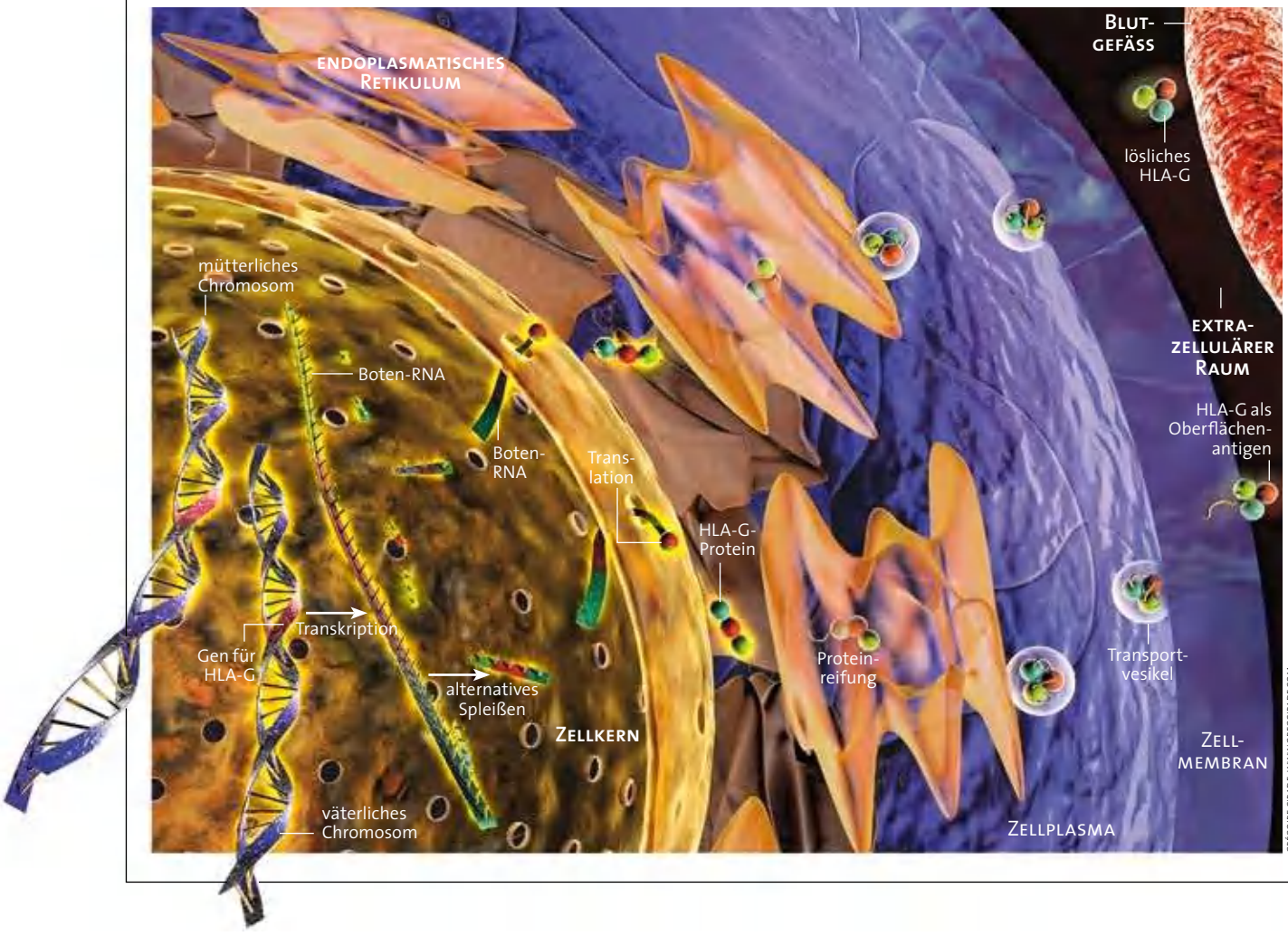
mindest welche von der Mutter, und Mütter einige von ihren Kindern (siehe SdW 9/2008, S. 54). Normalerweise schlägt das Immunsystem deswegen nicht Alarm.

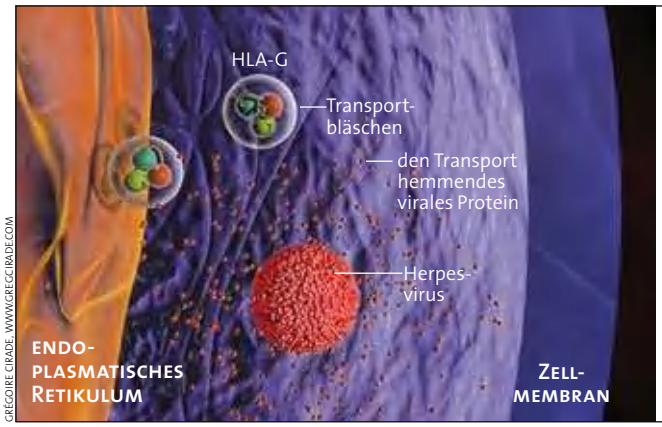
Doch es bestand der Verdacht, dass eine häufige Schwangerschaftsdermatose, das PUPP-Syndrom (englisch auch PEP genannt), hiermit zusammenhängt. Die Frauen bekommen am Unterleib, vor allem im Bereich des Nabels, stark juckenden Ausschlag. Solche »polymorphen Exantheme« treten bei etwa vier Prozent der Schwangeren typischerweise in den letzten Monaten vor der Geburt auf – gerade dann, wenn besonders viele fötale Zellen in den Körper der Mutter gelangen. 1998 wiesen wir in den erkrankten Hautpartien tatsächlich fötale Zellen nach. Anschließend konnten wir durch Hautuntersuchungen zeigen, dass das Antigen HLA-G nur während der Schwangerschaft in der Haut vorkommt, und zwar auch bei Frauen ohne PUPP-Syndrom – was bedeuten musste, dass in dieser Zeit fötale, HLA-G produzierende Zellen auch andernorts im mütterlichen Organismus auftreten. Mittlerweile ist klar, dass Mütter Zellen ihrer Kinder oft über Jahrzehnte nach der Geburt in sich tragen, also häufig wohl lebenslang. In der Haut ließen sich bisher noch nach 27 Jahren Zellen nachweisen, die vom Fötus stammen mussten.

Die Immuntoleranz zwischen Mutter und Kind stützt sich nicht ganz allein auf HLA-G. Beispielsweise treten wenige Wochen nach der Befruchtung beim Fötus so genannte regulatorische T-Lymphozyten in Erscheinung, eine weitere Sorte

Ein Gen für sieben Protein-Isoformen

Das fötale Antigen HLA-G erscheint gleich in sieben Versionen oder Isoformen trotz nur eines – zweimal vorhandenen – Gens, einer Variante vom Vater und einer von der Mutter. An den Chromosomen wird dieses Gen zunächst in RNA umgeschrieben oder kopiert (hier nur für eines der beiden Gene gezeigt). Der RNA-Strang wird dann unterschiedlich zerschnitten und in Teilen wieder zusammengesetzt, ein als alternatives Spleißen bezeichneter Vorgang, der einzelne Abschnitte aussondert. Das ergibt sieben verschiedene Proteinvorlagen, die den Zellkern verlassen. Die dann hergestellten Proteine erhalten im endoplasmatischen Retikulum ihre endgültige Gestalt. Nun gelangen sie in Transportvesikeln an die Zelloberfläche. Die Proteine HLA-G1 bis -G4 verbleiben dort, während die löslichen Isoformen G5 bis G7 ins fötale Blut und ins Fruchtwasser übertreten.





GRÉGOIRE CIRADE; WWW.GREGCIRADE.COM

Fehlgeburt durch Herpesvirus

Infiziert sich eine Schwangere erstmals mit dem Herpesvirus, kann der Erreger auch den Trophoblasten befallen. Dort setzt er Proteine frei, die den Transport von HLA-G zur Zelloberfläche verhindern. Die Folge: Der Schutzschild gegen Killerzellen der Mutter schwindet.

von Immunzellen. Sie verhindern, dass natürliche Killerzellen des Kindes mütterliche Zellen angreifen, die in sein Blut gelangt sind. Allerdings wirken jene anderen Faktoren nur vorübergehend in bestimmten Schwangerschaftsphasen. Außerdem sind sie für eine komplikationslose Schwangerschaft nicht unbedingt erforderlich, denn ihr Ausfall hat nicht zwangsläufig eine Fehlgeburt zur Folge. Nur HLA-G ist anscheinend unverzichtbar. Diese fötalen Antigene leisten in dem Zusammenhang offenbar sogar noch manches mehr, als mütterliche Killerzellen in Schach zu halten. So helfen sie unter anderem dabei, die Produktion von regulatorischen T-Zellen anzukurbeln, die ihrerseits für ein gegenseitiges Toleranzmilieu bei Mutter und Kind sorgen.

Inzwischen versuchen Forscher, aus diesen Immunmolekülen medizinisch Nutzen zu ziehen. Das gilt zunächst natürlich für die Schwangerschaft. Weil sich ein in vitro befruchtetes Ei umso eher einnistet, je mehr lösliches HLA-G der Embryo produziert, können solche Messungen Entscheidungshilfe geben, wie viele Embryonen man der Frau überträgt. Außerdem würden Forscher gern Wege finden, im Bedarfsfall die Produktion von HLA-G zu steigern. So fördern bestimmte lösliche Immunmoleküle – Interleukine und Zytokine – die Herstellung solcher Antigene in Zellen, die sie sonst nicht oder nur unzureichend produzieren.

Nach der Geburt verschwindet HLA-G in fast allen Geweben. Bei einer späteren Organtransplantation könnte es allerdings hilfreich sein, weil es vermutlich die Abstoßungsgefahr vermindert. Und tatsächlich tritt das Antigen in dieser Situation manchmal offenbar von selbst wieder auf den Plan, in der Regel beim transplantierten Organ. So wiesen wir etwa im Jahr 2000 zusammen mit dem Herzchirurgen Alain Carpentier bei einem verpflanzten Herzen HLA-G nach – das ist etlichen Studien zufolge keine Ausnahme und findet sich gleichfalls bei anderen Organen. Wie sich zeigte, sinkt das Abstoßungsrisiko für den Fremdkörper bei einem höheren HLA-G-Spiegel. 2010 beobachteten wir, dass die Chancen des Organerhalts nach einer Nierentransplantation steigen, wenn man die HLA-G-Synthese anregt.

Andererseits benutzen leider auch Tumoren solche Antigene, womit sie sich vor Säuberungsaktionen des Immunsystems schützen. Fast alle Krebszellen und ihre nächste Umgebung exprimieren HLA-G, und dessen Menge bestimmt den Verlauf der Erkrankung. Deswegen suchen Forscher inzwischen nach Möglichkeiten, bei Krebs diese Immunmoleküle mit Antikörpern gezielt zu blockieren (siehe auch SdW 3/2012, S. 24).

Die Schlüsselrolle der HLA-G-Proteine für die immunologische Verträglichkeit von Mutter und Kind in der Schwangerschaft ist heute allgemein anerkannt. Aber auch ihre Bedeutung bei einer Reihe von Krankheiten bis hin zu Autoimmunleiden und Entzündungen wird immer deutlicher. Offenbar haben sie ganz generell eine wichtige Funktion bei der Gewebetoleranz.

DIE AUTOREN

Edgardo D. Carosella, Mitglied der französischen Akademie der Wissenschaften, und **Nathalie Rouas-Freiss** arbeiten in führenden Positionen am Krankenhaus Saint-Louis in Paris. Carosella leitet die dortige Forschungsabteilung für Hämato-Immunologie (SRHI), innerhalb deren Rouas-Freiss dem Labor für Immunologie und Transplantation (LIT) vorsteht.

QUELLEN

Carosella, E.D. et. al.: The Role of HLA-G in Immunity and Hematopoiesis. In: Cellular and Molecular Life Sciences 68, S. 353–368, 2011
Hunt, J.S., Langat, D.L.: HLA-G: A Human Pregnancy-Related Immunomodulator. In: Current Opinion in Pharmacology 9, S. 462–469, 2009
Rebmann, V. et al.: Soluble HLA-G is an Independent Factor for the Prediction of Pregnancy Outcome after ART: a German Multi-Centre Study. In: Human Reproduction 25, S. 1691–1698, 2010
Rouas-Freiss, N. et. al.: Direct Evidence to Support the Role of HLA-G in Protecting the Fetus from Maternal Uterine Natural Killer Cytolysis. In: Proceedings of the National Academy of Sciences USA 94, S. 11520–11525, 1997

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1149645**

BIOCHEMIE

Ein Ring für die Farben des Lebens

Was verbindet König Georg III. von England mit Vampiren und Herbiziden? Antwort: eine Klasse von organischen Pigmentmolekülen!

Von Franck E. Dayan und Emilie A. Dayan

Ohne sie wäre das Leben sicher weniger bunt; denn die Porphyrine – ihr Name ist von dem griechischen Wort »porphyros« für purpurfarben abgeleitet – sind die häufigsten Farbstoffe im Tier- und Pflanzenreich. Sie haben alle dasselbe chemische Grundgerüst: Vier so genannte Pyrrolringe aus je vier Kohlenstoffatomen und einem Stickstoffatom sind durch vier Methingruppen (CH) zu einem großen, ebenen, aromatischen Ring verbunden (Grafik S. 32). Dieser kann in seinem Zentrum eine Reihe verschiedener Metallionen binden.

Jeder solche Komplex hat eine besondere Farbe – und eine spezielle biologische Funktion. Die grünen Chlorophylle enthalten Magnesium und spielen eine wesentliche Rolle bei der Fotosynthese der Pflanzen. Die roten Häme sind Eisen-Porphyrin-Komplexe und dienen als Sauerstoff- und Kohlendioxidtransporter im Blut sowie als Bestandteile der Elektronentransportkette für die Zellatmung. Außerdem verleihen sie als Kofaktoren vielen Enzymen ihre katalytische Aktivität.

Mit Nickel im Ringzentrum bilden Porphyrine das Koenzym F430, das eine Schlüsselfunktion im Methanstoffwechsel von Bakterien ausübt. Vitamin B_{12} schließlich entsteht durch Bindung von Kobalt an einen Porphyrinabkömmling. Der Mangel an diesem Vitamin verursacht die perniziöse Anämie, eine Form der Blutarmut, und beeinträchtigt die Funktion von Gehirn und Nerven. Da die Porphyrine in fast allen Organismen vorkommen und wesentliche Aufgaben erfüllen, können sie demnach mit Fug und Recht als die »Farben des Lebens« gelten.

Deshalb überrascht es auch kaum, dass Störungen ihres Stoffwechsels weit reichende Folgen haben. Eine solche Porphyrie beim englischen König Georg III. (1738–1820) wirkte sich wahrscheinlich verhängnisvoll auf seine politischen Entscheidungen aus und führte so zum Abfall der amerikanischen Kolonien und zur Gründung der Vereinigten Staaten von Amerika. Typische Symptome dieser Krankheit finden sich auch bei der literarischen Figur des Grafen Dracula und haben zum Entstehen des Vampirmythos beigetragen. Schließlich beruht die Wirkung bestimmter Unkrautvernichtungsmittel auf der gezielten Hemmung der Porphyrinsynthese.

AUF EINEN BLICK

VIELSEITIGES GRUNDGERÜST

1 Der gleiche **16-gliedrige aromatische Ring** liegt so unterschiedlichen Biomolekülen wie dem roten Blutfarbstoff **Hämoglobin**, dem grünen Blattpigment **Chlorophyll** und dem **Vitamin B_{12}** zu Grunde. Alle drei Verbindungen teilen sich folglich denselben fundamentalen Biosyntheseweg.

2 Störungen dieses Wegs können sich bei ganz unterschiedlichen Organismen in vielfältiger Weise bemerkbar machen. Beim Menschen verursachen sie eine Klasse von **Erbkrankheiten**, die als **Porphyrien** bezeichnet werden.

3 Wie die posthume Diagnose des britischen Königs **Georg III.** ergab, litt er höchstwahrscheinlich an einer Porphyrie, die neurologische Symptome hervorruft. Das erklärt eventuell sein **irrationales Verhalten** gegenüber den amerikanischen Kolonien, das deren Abfall vom Mutterland auslöste.

4 Manche Porphyrien führen zu **Lichtempfindlichkeit** und **körperlichen Missbildungen**, die möglicherweise den Anlass zu **Vampirlegenden** gaben.

5 Eines der frühen **Herbizide** aus den 1960er Jahren wirkte durch **Hemmung eines Enzyms**, das einen Schritt auf dem Porphyrinbiosyntheseweg katalysiert. Die Pflanzen wurden dadurch ähnlich lichtempfindlich wie bestimmte Porphyriepatienten.

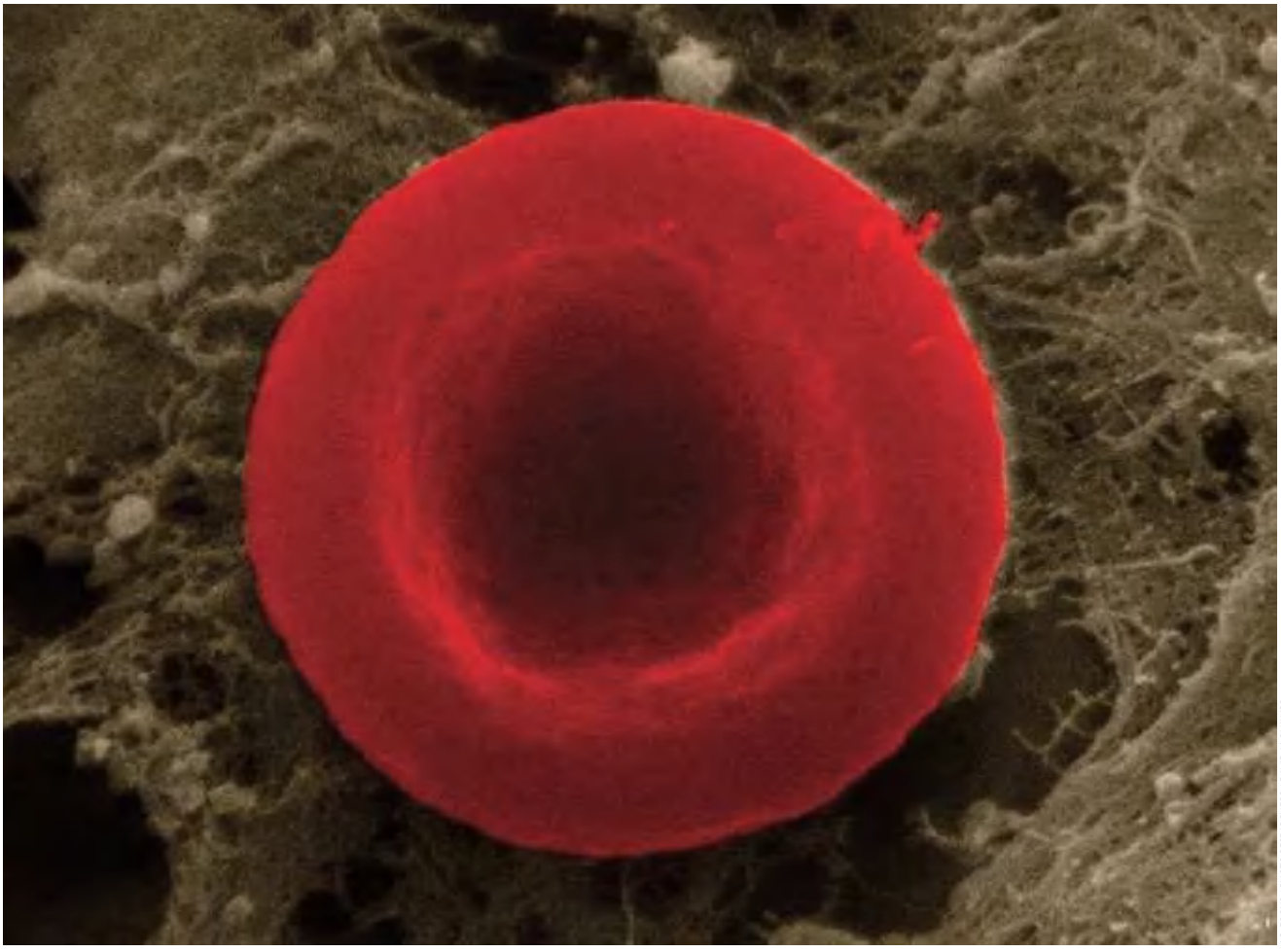
Die Porphyrine bilden sich im Pflanzen- und Tierreich aus unterschiedlichen Vorläufermolekülen. Doch ab der delta-Aminolävulinsäure sind die nächsten Syntheseschritte bis zum Protoporphyrin bei allen Organismen identisch (siehe Grafik S. 32). Danach bindet das noch universell einsetzbare Molekül das jeweilige Metallion und wird so auf seine spätere Funktion festgelegt. Ab hier trennen sich die Syntheserouten wieder.

Den letzten gemeinsamen Schritt – den Übergang vom Protoporphyrinogen zum Protoporphyrin – katalysiert eine Oxidase. Sie sitzt bei Tieren an der inneren Membran der Mitochondrien, den Kraftwerken der Zellen. Pflanzen hingegen verfügen zusätzlich über eine zweite Form des Enzyms. Diese befindet sich auf der äußeren Membran der Chloropasten, in denen die Fotosynthese stattfindet. Die beiden Varianten haben nur 25 Prozent ihrer Aminosäuresequenz gemeinsam und werden von unterschiedlichen Signalpeptiden flankiert – kurzen Aminosäureketten, die neu synthetisierte Proteine zu ihren jeweiligen Bestimmungsorten in der Zelle dirigieren.

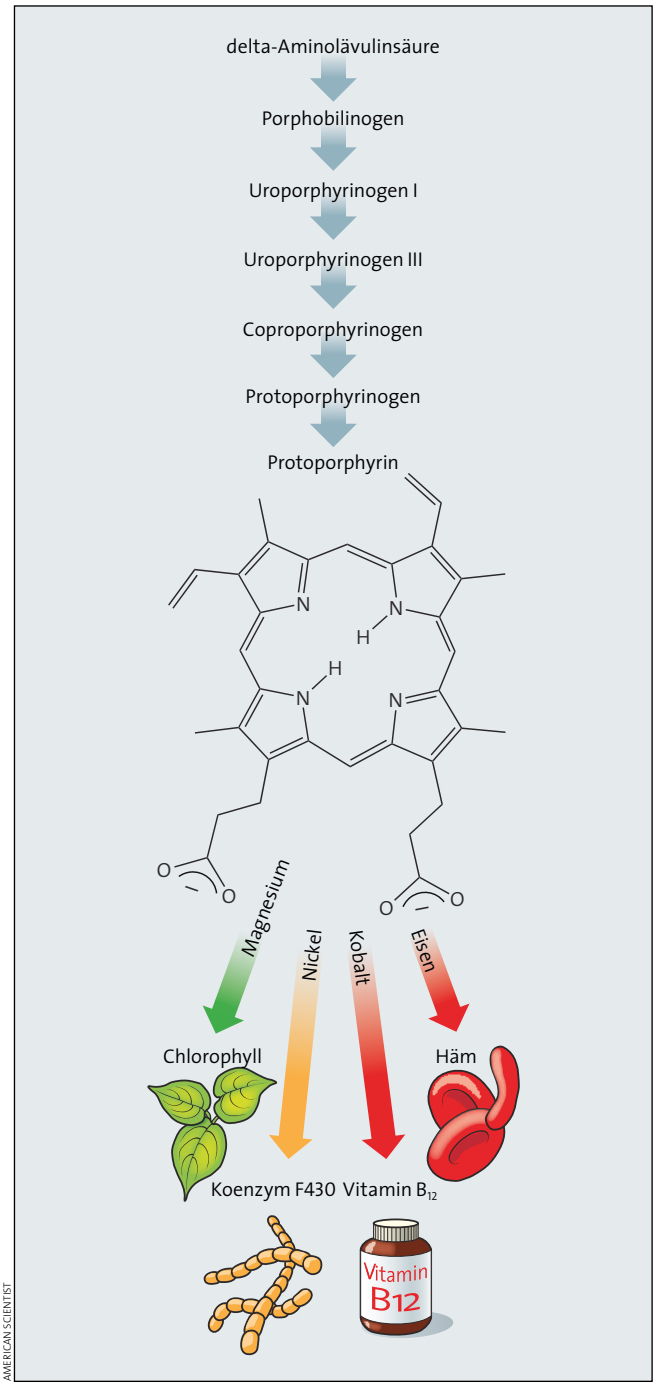
Die Protoporphyrinogen-Oxidase entfernt insgesamt sechs Wasserstoffatome aus ihrem farblosen Substrat und verwandelt es auf diese Weise in das durch Licht aktivierbare, rote Pigment Protoporphyrin IX. Der Reaktionsmechanismus ist noch nicht vollständig aufgeklärt. Es handelt sich um drei aufeinander folgende, vom Kofaktor Flavin-Adenin-Dinukleotid (FAD) vermittelte Dehydrierungen am inneren Ring des Protoporphyrinogen-Moleküls mit einer nachgeschalteten komplexen Umlagerung der verbliebenen Wasserstoffatome.

Die genaue Kenntnis des enzymatischen Synthesewegs der Porphyrine ist wichtig, um zu verstehen, welche Krankheiten im Fall einer Störung entstehen. Betrachten wir als Beispiel das Häm beim Menschen. Es wird hauptsächlich in der Leber und im Knochenmark hergestellt und landet größtenteils im Hämoglobin der roten Blutkörperchen. Die Anhäufung violettroter Porphyrinzwischenprodukte fern ihres normalen Bestimmungsorts im Organismus ist das Merkmal einer Gruppe von Erbkrankheiten, die man als Porphy-

Die torusartige Gestalt der roten Blutkörperchen, hier in 15 000-facher Vergrößerung abgebildet, erinnert an das ringförmige Protoporphyrinmolekül, dessen Pigmentderivat Häm für die rote Farbe der Erythrozyten verantwortlich ist. Porphyrine spielen bei Lebewesen aller Organismenreiche in verschiedenen Funktionen eine fundamentale Rolle.



AG. FOCUS / PHOTO RESEARCHERS / DAVID M. PHILLIPS



Der Porphyrinsyntheseweg beginnt bei der delta-Aminolävulinsäure. Jeder Schritt wird von einem anderen Enzym katalysiert, wobei die Protoporphyrinogen-Oxidase die Umwandlung zum letzten universellen Porphyrinvorläufermolekül vollzieht: dem Protoporphyrin. Diese Ringverbindung, deren Molekülstruktur in der Abbildung gezeigt ist, kann verschiedene Metallionen binden. Die entstehenden farbigen Komplexe üben in den unterschiedlichsten Organismen essenzielle Stoffwechselfunktionen aus. Häm übernimmt den Sauerstofftransport im Blut. Vitamin B_{12} ist entscheidend für die einwandfreie Funktion von Hirn und Nerven. Chlorophyll dient zum Auffangen von Sonnenlicht bei der Fotosynthese der Pflanzen, und Koenzym F430 spielt eine zentrale Rolle im Stoffwechsel von Methanbakterien.

rien bezeichnet. Sie können ganz verschiedene Körperteile und -funktionen betreffen.

Kutane Porphyrien beispielsweise verursachen durch Licht hervorgerufene Schwellungen der Haut mit Juckreiz bis hin zu Ausschlägen und Blasenbildung. Akute Porphyrien dagegen betreffen das Nervensystem, wobei die Symptome teilweise durch den Mangel an Vitamin B_{12} entstehen, das sich von einem Porphyrin ableitet. Es kommt zu Störungen der Hirnfunktion, die von leichter Verstimmung bis zu schweren neurologischen Ausfällen reichen und mit Schmerzen, Muskelschwäche und Erbrechen einhergehen können. Zu den akuten Porphyrien zählen drei verwandte Erbkrankheiten: die akute intermittierende Porphyrie, die hereditäre Koproporphyrie und die Porphyria variegata. Die anfallartig auftretenden Symptome werden dabei häufig durch Fremdstoffe ausgelöst – wie Schwermetalle, halogenierte aromatische Kohlenwasserstoffe und andere Substanzen, die in die Porphyrinsynthese eingreifen können.

Bei der Porphyria variegata funktioniert die Protoporphyrinogen-Oxidase nur eingeschränkt. Eines der beiden Exemplare des zugehörigen Gens ist defekt, so dass die Enzymaktivität nur ungefähr die Hälfte des normalen Niveaus erreicht. Die Betroffenen können sowohl unter neuropsychiatrischen Symptomen leiden als auch unter Hautschäden durch eine chronische lichtinduzierte Dermatitis, wobei verstärkt Porphyrine im Stuhl auftreten. Etwa drei Viertel von ihnen entwickeln allerdings überhaupt keine Krankheitssymptome und führen ein normales Leben. Dennoch besteht das Risiko plötzlicher Ausbrüche. Deshalb sollten die Betroffenen bestimmte Vorsichtsmaßnahmen befolgen, um nicht mit Auslösern in Kontakt zu kommen. Auch bei den 25 Prozent, die tatsächlich erkranken, verschwinden nach Abklingen der Schübe die Symptome in der Regel wieder vollständig. Die Anfälle werden außerdem mit zunehmendem Alter immer seltener. Allerdings können Prophyrieschübe sehr schwer verlaufen – und dann auch das Umfeld stark in Mitleidenschaft ziehen.

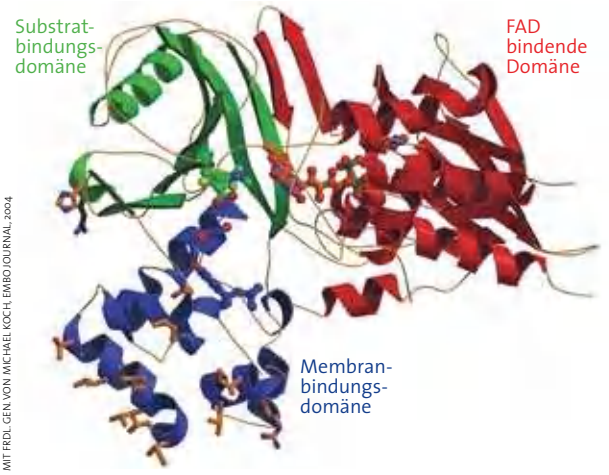
Warum das Urteilsvermögen von Georg III. zeitweilig getrübt war

Das zeigt sich am Beispiel Georgs III. Er regierte 60 Jahre, von 1760 bis zu seinem Tod, und gehört damit zu den britischen Monarchen mit der längsten Amtszeit. Während er über das Empire herrschte, stieg es zur weltweit führenden Handelsmacht auf und war dabei, die militärische Vorherrschaft über die Weltmeere zu erringen. Seine Regentschaft wurde jedoch überschattet von einer merkwürdigen Erkrankung. Diese dürfte für die mitunter irrationalen Entscheidungen des Königs verantwortlich gewesen sein, die möglicherweise den amerikanischen Unabhängigkeitskrieg und den Verlust der Kolonien in der Neuen Welt zur Folge hatten.

Die Krankenakten von Georg III. enthalten zahlreiche gut dokumentierte Hinweise auf Schübe eines schweren, unheilbaren Leidens, das ihn immer wieder heimsuchte. Während fünf längerer Krankheitsphasen gingen die körperlichen

Aufbau der Protoporphyrinogen-Oxidase

Die mitochondrielle Protoporphyrinogen-Oxidase besteht aus drei funktionellen Untereinheiten oder »Domänen«. Eine davon (blau) verankert das Protein in der Organelle, in der es seine Funktion ausübt. Die zweite (grün) bindet das zu oxidierende Molekül, also das Protoporphyrinogen. Die dritte (rot) beherbergt den Kofaktor Flavin-Adenin-Dinukleotid (FAD), der für die vom Enzym katalysierte Reaktion benötigt wird. FAD kann Elektronen von einem Molekül auf ein anderes übertragen und hat deshalb zahlreiche essenzielle Funktionen in der Zelle, insbesondere beim Energiestoffwechsel. In der Protoporphyrinogen-Oxidase deckt es das aktive Zentrum wie ein Dach ab. In diesem Zentrum wird das Protoporphyrinogen durch Entzug von sechs Wasserstoffatomen in Protoporphyrin umgewandelt. Dabei sorgt ein Glycinrest für die korrekte Anordnung des Substrats. Seine Position relativ zum gegenüberliegenden FAD entscheidet über die Geschwindigkeit der Reaktion, weil von ihr der Abstand zwischen dem Ringsystem des Protoporphyrinogens und dem Kofaktor abhängt.



MIT FRDL. GEN. VON MICHAEL KOCH, EMBO JOURNAL, 2004

Symptome auch mit einer stark getrübten geistigen Verfassung einher. Als der Monarch im Verlauf eines Schubs zwischen Oktober 1788 und Februar 1789 unfähig war, die Regierungsgeschäfte zu führen, kam es zu einer schweren Verfassungskrise über die Frage, wer unter welchen Umständen den Thronfolger als Regenten einsetzen dürfe. Doch dann erholte sich der König überraschend wieder.

Als Ursache dieser Phasen geistiger Verwirrung vermuteten zeitgenössische Ärzte eine psychiatrische Erkrankung. Eine genauere Diagnose wurde jedoch erst lange nach seinem Tod gestellt, als ab Mitte der 1960er Jahre mehrere Wissenschaftler die Vermutung äußerten, der König habe an einer Porphyrie gelitten. Tatsächlich finden sich in den historischen Aufzeichnungen über seine Krankengeschichte Belege für die typischen Symptome dieser Krankheit – darunter schwere Bauchschmerzen, portweinartig verfärbter Urin sowie Lähmungen an Armen und Beinen. Zunächst vermuteten die Forscher eine intermittierende Porphyrie. Eine nachfolgende Untersuchung, die auch die medizinischen Aufzeichnungen über seine Vorfahren, Nachkommen und Verwandten aus Seitenlinien einbezog, führte dann zur Diagnose Porphyria variegata.

König Georg III. könnte unter einer besonders schweren Form dieser Erbkrankheit gelitten haben. Der erste Schub

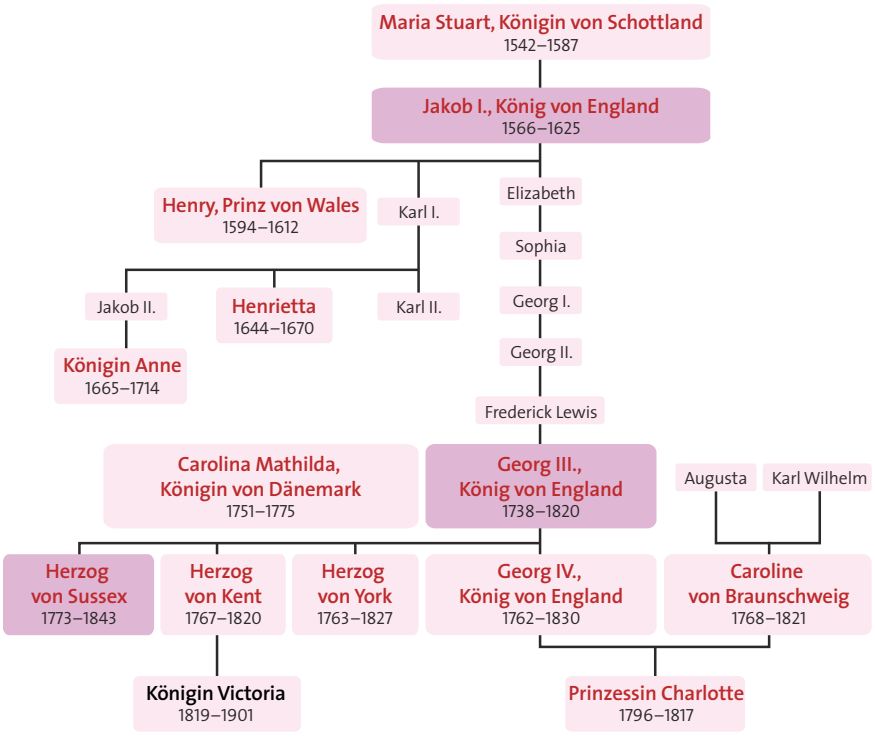
AKG IMAGES

Die Lithografie von 1850 zeigt in idealisierter Form die Kapitulation des britischen Heerführers Lord Cornwallis vor US-General George Washington – symbolisiert durch die traditionelle Übergabe des Schwertes – nach der Niederlage bei Yorktown (Virginia) im Jahr 1781. Der englische König Georg III. litt vermutlich an einer Porphyrie, die bei schweren Krankheitsschüben sein Urteilsvermögen beeinträchtigte. Dadurch brachte er möglicherweise nicht die nötige Flexibilität für eine diplomatische Lösung des Konflikts auf.

Ein Erbleiden und seine Folgen

Der Spielfilm »Ein Königreich für mehr Verstand« zeigt, wie sich der britische König Georg III., dargestellt von Nigel Hawthorne (Foto), durch seine Porphyrie-Erkrankung immer wieder zu irrationalen Entscheidungen hinreißen lässt. Ida MacAlpine und ihre Kollegen identifizierten im Jahr 1968 zahlreiche Mitglieder der königlichen Familie, die anscheinend an einer Porphyrie litten oder den zu Grunde liegenden Gendefekt vererbten, ohne selbst zu erkranken (Diagramm). Rot gedruckt sind die Namen von Personen, bei denen Hinweise auf eine manifeste Porphyrie vorliegen. Auf purpurfarbenem Hintergrund stehen diejenigen, bei denen über eine Verfärbung des Urins berichtet wurde. Da 75 Prozent der Genträger der Porphyria variegata asymptomatisch bleiben, ist es nicht verwunderlich, dass bei vielen Angehörigen der königlichen Familie keine Anzeichen einer Porphyrie dokumentiert sind. Dennoch haben sie den Gendefekt vermutlich an ihre Nachkommen weitergegeben.

FILMSZENE: ACTION PRESS / EVERETT COLLECTION / SAMUEL GOLDWYN; DIAGRAMM NACH: MACALPINE, HUNTER & RIMINGTON, 1968



trat 1765 auf, vier Jahre nach seiner Heirat mit Charlotte von Mecklenburg-Strelitz. Weitere Anzeichen der Störung verzeichneten die Ärzte dann 1788 und 1789. Von 1811 an bis zum Tod des Herrschers im Jahr 1820 verschlechterte sich sein Gesundheitszustand stetig. Die Erkrankung beeinträchtigte ihn schließlich so stark, dass er ständiger Pflege bedurfte und seine Privatgemächer auf Schloss Windsor nicht mehr verlassen konnte.

Die Porphyria variegata ist zwar eine Erbkrankheit, die akuten Schübe können jedoch durch toxische Metalle ausgelöst werden. Wenn König Georg III. also tatsächlich einen genetischen Defekt der Protoporphyrinogen-Oxidase hatte, wäre er besonders anfällig gegenüber Schwermetallen und anderen Schadstoffen gewesen, denen die Menschen im England der damaligen Zeit vielfach ausgesetzt waren. Eine chemische Analyse von Haarproben, die Timothy J. Cox und seine Kollegen von der University of Cambridge 2005 vornahmen, ergab zwar keine bedenklichen Konzentrationen an Quecksilber und Blei, aber deutlich erhöhte Mengen an Arsen. Dieses Element, das als Verunreinigung in dem damals gebräuchlichen Arzneimittel Brechweinstein vorkommt, könnte die wiederholten schweren Porphyrieschübe ausgelöst haben.

Spurensuche im Stammbaum

Im Jahr 1968 untersuchten die britische Ärztin Ida MacAlpine und ihre Kollegen die Krankengeschichten von Mitgliedern des Stammbaums von Georg III. über insgesamt 13 Generationen und mehr als 400 Jahre hinweg. Bei vielen fanden sich Hinweise auf eine Porphyrie (Diagramm oben). Etliche andere Familienmitglieder dürften den genetischen Defekt aufgewiesen und ihn weitervererbt haben, obwohl die vorliegenden medizinischen Informationen keine Symptome erkennen lassen. Wahrscheinlich zählten sie zu den 75 Prozent der Betroffenen, die nicht erkranken. Untersuchungen zufolge, die Lindsay C. Hurst vom Moorhaven Hospital, einer ehemaligen Nervenheilanstalt nahe Plymouth (England), 1982 durchführte, lässt sich die Porphyrie im Stamm-

baum von Georg III. sogar noch weiter zurückverfolgen, nämlich bis zu Heinrich VI. von England und Karl VI. von Frankreich im 14. und 15. Jahrhundert. Martin J. Warren von der University of Kent erforschte mit seinen Kollegen 1996 die Nachfahren Georgs III. und fand auch hier Hinweise auf die Erkrankung.

Die Porphyrie des britischen Königs hatte durch ihre Auswirkungen auf seine körperliche und geistige Verfassung vermutlich auch weit reichende Folgen für den Verlauf der Geschichte. Nach dem Ende der Kriege in Frankreich und Indien im Jahr 1763 erhob England diverse Steuern und erließ eine Reihe neuer Gesetze, um die Autorität des Empire über die amerikanischen Kolonien zu festigen. Die Kolonisten, die britische Staatsbürger waren, widersetzten sich dieser Machtdemonstration des Mutterlands und erklärten, es dürfe keine »Besteuerung ohne parlamentarische Vertretung« der Kolonien geben.

Als sich die Spannungen verschärften, vertrat der König zunehmend rigide Positionen und entsandte Truppen, um den Aufstand der Boston Tea Party niederzuschlagen. Er entmachtete örtliche Regierungen und ersetzte sie durch königliche Beamte. Amerikanische Patrioten mobilisierten daraufhin ihre Milizen, und im Jahr 1775 begann der amerikanische Unabhängigkeitskrieg. Historischen Berichten zufolge verweigerte sich der König im Verlauf der Auseinandersetzung hartnäckig – und anscheinend ohne vernünftige Begründung – sämtlichen diplomatischen Lösungsversuchen. Dieser Starrsinn führte schließlich dazu, dass sich die Kolonisten im Juli 1776 von der britischen Herrschaft lossagten. Der Unabhängigkeitskrieg endete mit der Kapitulation von Lord Cornwallis in Yorktown am 19. Oktober 1781. Im Pariser Vertrag verzichtete die britische Krone 1783 formal auf alle Herrschaftsansprüche auf dem Gebiet der Vereinigten Staaten von Amerika.

Einige Historiker sind der Meinung, dass die Porphyrie an den Kräften des Königs zehrte, seine Urteilskraft trübte und ihn reizbar und launisch machte. Dieses Bild zeichnet auch der Spielfilm »Ein Königreich für mehr Verstand« von 1994. Demnach verleiteten Stimmungsschwankungen und kognitive Beeinträchtigungen den Herrscher zu einer Reihe unkluger und voreiliger Entscheidungen, die letztlich die amerikanischen Kolonien dazu brachten, alle Bindungen zum britischen Mutterland zu kappen – sehr zum Schaden für das Empire und die Royalisten in Amerika. Die erwähnten Historiker kommen jedenfalls zu dem Schluss, dass Georg III. ohne die Porphyrie-Erkrankung den Ausbruch des Unabhängigkeitskriegs vermutlich hätte abwenden können.

Es sei jedoch nicht verschwiegen, dass die rückblickend anhand historischer Dokumente gestellte Diagnose einer schubförmig verlaufenden Porphyrie nicht alle Wissenschaftler und Historiker überzeugt. So veröffentlichten Timothy J. Peters von der University of Birmingham und Kollegen 2010 zwei Untersuchungen, in denen sie die Krankengeschichte des Königs aus internistischer und psychiatrischer Perspektive erneut aufarbeiteten. Dabei kamen sie zu dem Schluss, dass Georg III. wohl eher an einer bipolaren (manisch-depressiven) Störung litt. Um welche Krankheit es sich tatsächlich handelte, wird vielleicht nie definitiv geklärt werden.

Ein grausamer Türkenhasser

Eine andere historische Episode, die eine Verbindung zwischen Porphyrien und der Entstehung von Vampirlegenden herstellt, führt uns nach Osteuropa. Im mittleren bis späten 15. Jahrhundert herrschte dort Vlad(islav) III., geboren 1431, über die Walachei (eine Gegend im heutigen Rumänien). Er war ein Enkel von Mircea dem Älteren, der das Fürstentum von 1386 bis 1418 regiert hatte. Vlad gehörte dem Drachenorden an, einem in Ungarn gegründeten religiösen Ritterbund, der das Christentum gegen das Osmanische Reich verteidigen sollte. Als despotischer Herrscher baute er ein gut organisiertes Militärwesen auf, das die Handelswege zu den Nachbarländern sicherte und dadurch den Warenaustausch förderte.

Vlad behandelte seine Feinde extrem grausam, gleich ob es sich um Landsleute oder Fremde handelte. Er verurteilte zahllose Menschen zum Tod durch die vielfältigsten Hinrichtungsarten wie Enthäuten, Köpfen, Zerhacken, Strangulieren, Erhängen, Kochen und Verbrennen. Anderen Delinquenten ließ er Nase, Ohren, Geschlechtsteile oder Gliedmaßen ab-

PUBLIC DOMAIN

AKG IMAGES / UNIVERSAL PICTURES

Vlad III., der im 15. Jahrhundert als Woiwode über die Walachei herrschte, trug den Beinamen Dracula, »Sohn des Drachen« (oben). Sein Blutdurst und etliche Vampirlegenden inspirierten den irischen Schriftsteller Bram Stoker zur fiktiven Figur gleichen Namens, im Filmklassiker 1931 gespielt von Bela Lugosi (links). Aussehen und Verhalten der Untoten in frühen Vampirmythen spiegeln möglicherweise die körperlichen Symptome von Porphyriekranken wider.

schneiden. Seine bevorzugte Tötungsart war jedoch das Pfählen. Das brachte ihm den Beinamen Tepes, der Pfähler, ein. Insgesamt soll Vlad III. für die Ermordung von 20 000 bis 40 000 Zivilisten aus verschiedenen europäischen Ländern verantwortlich sein. Am Ostersonntag 1459 ließ er zahlreiche Adlige seines Landes verhaften, die seinen Vater und seinen Bruder bei einer Rebellion getötet hatten, und allesamt pfählen.

Vlad Tepes verbrachte die Kindheit als teils misshandelte Geißel im Osmanischen Reich. Das schürte einen besonderen Hass gegen alles Türkische und den Islam in ihm. Als Sultan Mehmet II., genannt »der Eroberer«, 1462 einen Feldzug gegen Vlad unternahm, stieß er beim Einzug in die Hauptstadt der Walachei auf einen »Wald von Gepfählten«: Auf unzähligen Pfählen verwesten die Leichen von 20 000 türkischen Gefangenen. Insgesamt hat Vlad wohl an die 100 000 muslimische Gegner auf diese Art hinrichten lassen.

Zwar ging sein Blutdurst vermutlich nicht so weit, dass er buchstäblich das Blut seiner Feinde trank. Dennoch machte ihn seine Grausamkeit zum Vorbild für die literarische Figur des Grafen Dracula. Mythen von »untoten« Wesen, die sich vom Blut der Lebenden ernähren, gibt es in den meisten Kulturen seit uralten Zeiten. Der Ausdruck Vampir kam in Westeuropa jedoch erst auf, als osteuropäische Legenden solcher nächtlichen Schauerwesen im 18. Jahrhundert Popularität erlangten. Der irische Schriftsteller Bram Stoker hörte von Vlad Tepes 1890 bei einer Begegnung mit dem ungarischen Abenteurer und Orientalistikprofessor Ármin Vámbéry. Er war fasziniert von der schillernden Persönlichkeit des Fürsten und schuf seine Fantasiefigur auf der Basis der eindringlichen historischen Berichte über dessen Brutalität. Stoker schrieb mehrere Jahre an dem Roman »Dracula«, der schließlich im Mai 1897 erschien. Auch beim Namen der Titelgestalt stützte er sich auf die Lebensgeschichte des walachischen Fürsten. Dessen Vater hatte ebenfalls bereits dem Drachenorden angehört. Im Rumänischen heißt Drache »Dracul«. Deshalb gaben die walachischen Adligen Vlads Vater diesen Beinamen. Dracula bedeutet »Sohn des Dracul«.

Nichts deutet zwar darauf hin, dass Vlad Tepes an einer Porphyrie litt, und Stoker scheint das Krankheitsbild gar nicht gekannt zu haben. Laut David Dolphin, Chemiker an der University of British Columbia in Vancouver (Kanada) und Herausgeber eines siebenbändigen Werks über Porphyrien, bestehen jedoch auffallende Ähnlichkeiten zwischen der fiktiven Figur des Grafen Dracula und Symptomen dieses Leidens. Seiner Ansicht nach sind Porphyriepatienten die realen Vorbilder für solche Blut saugenden Fantasiewesen. Die Anhäufung auf Sonnenstrahlung ansprechender Peptide in der Haut und in der Netzhaut der Augen ruft nämlich eine ausgeprägte Lichtempfindlichkeit hervor, so dass die Betroffenen das schützende Dunkel suchen. Außerdem führt sie zu teils entstellenden Gewebeschädigungen, wobei sich etwa Finger und Lippen stark verschmälern. Das Zahnfleisch kann schwinden, so dass die Zahnhälse sichtbar werden und der Eindruck von Reißzähnen entsteht, die zudem wegen des erhöhten Prophyrinspiegels rötlich verfärbt erscheinen.

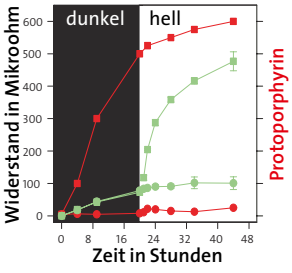
Demnach kann es durchaus sein, dass Fehlfunktionen der Protoporphyrinogen-Oxidase den medizinischen Hintergrund der Vampirmythen bilden. Zum Glück leben wir heute in einer aufgeklärten Welt, in der Porphyriepatienten als Opfer einer schweren Erkrankung ärztliche Hilfe erhalten und nicht auch noch stigmatisiert werden, indem man sie mit Furcht erregenden, Blut saugenden Fantasiegestalten in Verbindung bringt.

Vampire im Pflanzenreich

Interessanterweise gibt es auch Pflanzen, die an einer Porphyrie leiden. Das wurde allerdings lange nicht erkannt, weil solche »Vampirpflanzen« wegen der schwer wiegenden Auswirkungen ihres genetischen Defekts meist nicht lebensfähig sind. Im Jahr 1998 beschrieben Gongshe Hu, damals an der University of Missouri in Columbia, und seine Kollegen jedoch eine Maissorte namens Les22, die lichtabhängige Schäden an den Blättern zeigt. Den Forschern gelang es, sie

Herbizidwirkung

Herbizide, die die Protoporphyrinogen-Oxidase hemmen, lassen Blätter im Licht ausbleichen (links oben). Das Diagramm zeigt, wie sich der Protoporphyringehalt (rot) und der elektrische Widerstand (grün) als Maß für den Elektrolytverlust im Blattgewebe mit (Quadrate) und ohne Herbizid (Punkte) im Dunklen und im Hellen verändern. In Keimblättern der Gurke enthalten nur die Chloroplasten größere Mengen Protoporphyrin (links unten). Drei Stunden nach Auftragen des Herbizids hat es sich jedoch jeweils über die gesamte Zelle verteilt (rechts unten).



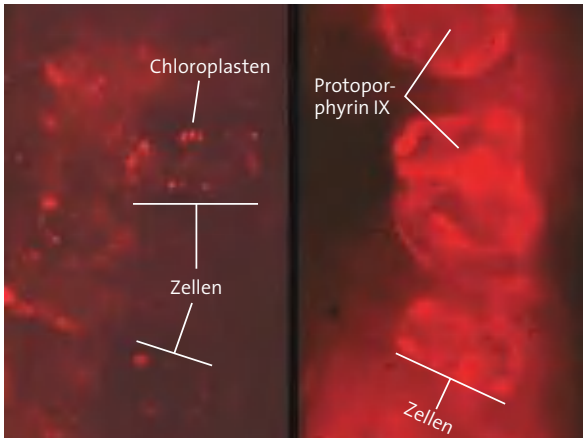
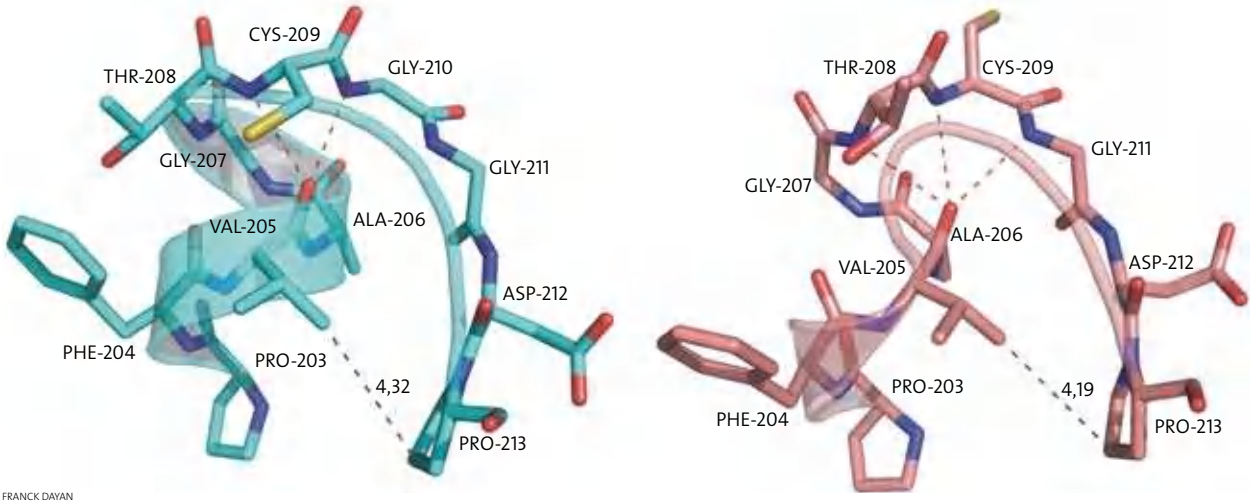


FOTO OBEN LINKS: FRANCK DAYAN; DIAGRAMM OBEN RECHTS: AMERICAN SCIENTIST;
ABBILDUNGEN UNTEN: MIT FRDL. GEN. VON STEPHEN O. DUKE, USDA

Resistenz durch fehlendes Glycin

Unkräuter haben jahrzehntelang keine Resistenzen gegen Herbizide entwickelt, welche die Protoporphyrin-Oxidase hemmen. Erst in jüngster Zeit wurde bei einem Fuchsschwanzgewächs namens *Amaranthus tuberculatus* eine widerstandsfähige Variante beschrieben. Als Ursache der Resistenz ließ sich eine Mutation im Gen *PPX2L* identifizieren, das für eine Protoporphyrinogen-Oxidase kodiert. In der linken Zeichnung ist die Struktur dieses Enzyms zu sehen.

Im mutierten Gen fehlt das Codon für die Aminosäure Glycin an Position 210 der Aminosäurekette, die am rechten oberen Rand des türkisfarben dargestellten normalen Moleküls erscheint. Das zugehörige Protein ist auf der rechten Seite in Rot abgebildet. Die Deletion vermindert zwar die katalytische Aktivität des Enzyms, verändert jedoch gleichzeitig die Bindungsstelle der Herbizide. Diese können sich deshalb nur schlecht anlagern und ihre Hemmwirkung nicht entfalten.



FRANCK DAYAN

zu klonieren und ihr Erbgut zu analysieren. Demnach weist sie einen Defekt im Enzym Uroporphyrinogen-Decarboxylase auf, das einen der frühen Schritte auf dem Porphyrinbiosyntheseweg katalysiert.

Mutationen dieses Enzyms verursachen beim Menschen die Prophyria cutanea tarda, die Hautschädigungen durch eine abnorme Ansammlung von Uroporphyrinogen verursacht. Es war Crispin B. Taylor von der American Society of Plant Biologists, der Les22 in einem Kommentar zur Publikation der Gruppe um Hu scherzhaft als Vampirpflanze bezeichnete, weil ihr Erscheinungsbild an die Symptome der Lichtsensibilisierung bei Porphyriepatienten erinnert. Natürlich auftretende Pflanzenmutanten mit anderen Störungen der Porphyrinsynthese – etwa Defekten der Protoporphyrinogen-Oxidase wie bei der Prophyria variegata – sind bisher nicht beschrieben worden.

Im Jahr 1964 kam jedoch ein Herbizid namens Nitrofen auf den Markt, das die Protoporphyrinogen-Oxidase hemmt. Sein Wirkmechanismus lag damals allerdings noch im Dunkeln. Nur so viel war bekannt: Unter Einwirkung dieses und ähnlicher Herbizide aus der Klasse der Diphenylether trocknen die Blätter im Sonnenlicht aus, kräuseln sich, werden braun und sterben ab. Das rührt unmittelbar daher, dass die Plasmamembranen der Pflanzen ihre Barrierefunktion einbüßen und unkontrolliert Feuchtigkeit austreten lassen. Zudem kommt die Fotosynthese zum Erliegen. Ethylen, Ethan und Malondialdehyd werden freigesetzt, und die Chloroplastenfarbstoffe bleichen aus. Kulturpflanzen erleiden zwar auch entsprechende Schäden, erholen sich jedoch rasch wieder, weil sie das Herbizid schnell abbauen.

Dass die Effekte von Nitrofen lichtabhängig sind, wurde 1969 entdeckt. Den Wirkmechanismus erkannte jedoch erst in den späten 1980er Jahren die Arbeitsgruppe um Michel Matringe vom Laboratoire des Herbicides in Dijon, das zum französischen Institut National de la Recherche Agronomique gehört. Demnach wird die Plasmamembran undicht, weil sich ein fotodynamisch aktiver Farbstoff darin anreichert. Dieser stellte sich wenig später als Protoporphyrin heraus (siehe Kasten links). Das deutete auf die Hemmung eines der nachfolgenden Schritte bei der Synthese von Chlorophyll hin. Doch keines der beteiligten Enzyme wurde bei Tests durch Nitrofen blockiert.

Das Rätsel löste sich, als der gleichen Arbeitsgruppe in Kooperation mit Experten der Porphyrinbiochemie die Parallele zur Anreicherung von Protoporphyrin bei der Porphyria variegata auffiel. Dadurch gelang es, die Protoporphyrinogen-Oxidase in Chloroplasten als Zielenzym des Herbizids auszumachen. Dass sich ausgerechnet das Produkt der gehemmten Enzymreaktion anhäuft, erscheint zunächst widersinnig. Das hängt wie bei der Porphyria variegata mit einer Umverteilung der sich ansammelnden Porphyrinvorläufer innerhalb der Zelle zusammen. Im Fall der Pflanze häuft

sich durch die Hemmung der Protoporphyrinogen-Oxidase das Protoporphyrinogen auf der Außenmembran der Chloroplasten so stark an, dass es schließlich ins Zytoplasma übertritt, wo andere, unspezifische Enzyme es in das fotodynamisch aktive Protoporphyrin umwandeln. Dieses erzeugt unter Lichteinwirkung hochreaktiven Singulett-Sauerstoff, der die Lipide der nur schwach geschützten Plasmamembran (per-)oxidiert.

Wie eine seltene Mutation ein Unkraut schützt

Nitrofen blieb lange Zeit hochwirksam. Offenbar gelingt es Unkräutern nur schlecht, Resistenzen gegen Herbizide zu entwickeln, die in die Porphyrinbiosynthese eingreifen. Erst neuerdings wurden widerstandsfähige Formen von *Amaranthus tuberculatus* aus der Familie der Fuchsschwanzgewächse beschrieben. Ihre Resistenz gegen eine breite Palette von Protoporphyrinogen-Oxidase-Inhibitoren äußert sich darin, dass sie weniger Protoporphyrin in der Plasmamembran anreichert und diese nicht so stark geschädigt wird. Die Ursache ist eine unvollständig dominante Mutation des Gens *PPX2L* im Zellkern. Dieses Gen kodiert eigentlich für die Protoporphyrinogen-Oxidase in den Mitochondrien, gegen die das Herbizid nicht primär wirkt. Da die betreffenden Enzymmoleküle unmittelbar nach ihrer Synthese am Stickstoffende einige zusätzliche Aminosäuren tragen, verfrachtet sie das Transportsystem der Zelle aber auch teilweise in die Chloroplasten.

Wie die Arbeitsgruppe um Patrick J. Tranel an der University of Illinois in Urbana-Champaign herausfand, führt nicht etwa eine einfache Punktmutation, also der Austausch einer Aminosäure durch eine andere, zur Herbizidresistenz, sondern ein fehlendes Glycin an einer entscheidenden Position im Enzymmolekül (siehe Grafik S. 37). Die entsprechende Mutation – Deletion eines Codons – ist ziemlich unwahrscheinlich. Sie kann auftreten, wenn die DNA-Polymerase beim Kopieren des Erbguts an einer Stelle mit vielfachen Wiederholungen kurzer, »sinnloser« Nukleotidfolgen ein kleines Stück verrutscht. Einer von uns (Franck E. Dayan) und seine Kollegen haben nachgewiesen, dass die Deletion die katalytische Aktivität des Enzyms verringert. Das schadet der Pflanze zwar, wird aber dadurch mehr als wettgemacht, dass das fehlende Glycin zugleich die Helixstruktur der Protoporphyrinogen-Oxidase destabilisiert, weshalb sich das Herbizid nur noch schlecht an das Enzym binden und es deshalb kaum hemmen kann.

Ungeachtet seiner Wirksamkeit als Herbizid hat sich Nitrofen allerdings beim Menschen als Krebs erregend und erbgutschädigend erwiesen. Außerdem greift es in den Hormonhaushalt ein. Da der tierische Organismus die Substanz nicht abbaut, reichert sie sich im Fettgewebe an. Bei Legehennen kann das Herbizid auf die Eier übergehen. Deshalb wurde der Einsatz von Nitrofen schon 1980 in der Bundesrepublik Deutschland und 1988 in der Europäischen Union verboten. 2002 kam es hier zu Lande zum Skandal, als das Herbizid ausgerechnet in Eiern und Geflügel aus Biobetrieben plötzlich wieder auftauchte. Als Ursache der Verseuchung stellten sich Restbestände aus DDR-Zeiten in einer ungenügend gereinigten Lagerhalle von Getreide für die Geflügelzucht heraus.

Die Natur geht haushälterisch mit ihren Erfindungen um. So nutzt sie die gleichen fundamentalen Molekülbausteine wie Aminosäuren, Nukleotide, Fettsäuren und Zucker zum Aufbau immer größerer Strukturen mit zunehmend komplexeren Funktionen. Das zeigt sich auch beim Porphyrinring, dem Grundgerüst der vielen anderen »Ringe des Lebens«. Der einzigartige Stoffwechselweg, auf dem er entsteht, kommt in praktisch allen Organismen vor und hat sich schon früh in der Evolutionsgeschichte entwickelt. Seine grundlegende Bedeutung bringt es mit sich, dass jede Störung der universellen Reaktionskaskade und insbesondere die Hemmung des letzten gemeinsamen Schritts vor dem Einbau des jeweiligen Metallions die unterschiedlichsten Auswirkungen auf alle möglichen Aspekte des Lebens hat.

DIE AUTOREN

Franck E. Dayan hat 1995 an der Auburn University (Alabama) in Botanik promoviert und ist Pflanzenphysiologe an der Natural Products Utilization Research Unit des US-Landwirtschaftsministeriums sowie Professor am Department of Medicinal Chemistry der University of Mississippi in Oxford. Einer seiner Forschungsschwerpunkte sind die Wirkmechanismen von Phytotoxinen. Hauptsächlich beschäftigt er sich mit Molekülen, die in die Porphyrinsynthese eingreifen. **Emilie A. Dayan** hat am Bachelor-Croft Institute for International Studies und dem Sally McDonnell Barksdale Honors College der University of Mississippi in Oxford studiert und Bachelor-Abschlüsse in Ökonomie, Internationalen Studien und Französisch erworben.

QUELLEN

Cox, T. M. et al.: King George III and Porphyria: An Elemental Hypothesis and Investigation. In: The Lancet 366, S. 332–335, 2005
Dayan, F. E. et al.: Biochemical and Structural Consequences of a Glycine Deletion in the Alpha-8 Helix of Protoporphyrinogen Oxidase. In: Biochimica et Biophysica Acta 1804, S. 1548–1556, 2010
Hu, G. et al.: A Porphyrin Pathway Impairment is Responsible for the Phenotype of a Dominant Disease Lesion Mimic Mutant of Maize. In: The Plant Cell 10, S. 1095–1105, 1998
Hurst, L. C.: Porphyria Revisited. In: Medical History 26, S. 179–182, 1982
Matringe, M. et al.: Protoporphyrinogen Oxidase as a Molecular Target for Diphenyl Ether Herbicides. In: Biochemical Journal 260, S. 231–235, 1989
Patzoldt, W. L. et al.: A Codon Deletion Confers Resistance to Herbicides Inhibiting Protoporphyrinogen Oxidase. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA 103, S. 12329–12334, 2006
Röhl, J. C. G. et al.: Purple Secret: Genes, »Madness« and the Royal Houses of Europe. Bantam Press, London 1998

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1149646**

© American Scientist
www.americanscientist.org

AcademiaNet

Das Rechercheportal für herausragende Wissenschaftlerinnen bietet:

:: Profile hochqualifizierter Akademikerinnen aller Fachrichtungen – ausgewählt von Vertretern renommierter deutscher Wissenschaftsorganisationen und Industrieverbände,
:: individuelle Suchmöglichkeiten nach Fachrichtungen, Arbeitsgebieten und weiteren Kriterien,
:: flankierende redaktionelle Beiträge zum Thema »Frauen in der Wissenschaft«,

kurz: einen einzigartigen Service für Entscheidungsträger aus Wissenschaft und Industrie ebenso wie für Journalisten und Veranstalter von Tagungen und Kongressen.

www.academia-net.de

»In Deutschland gibt es viele herausragende Wissenschaftlerinnen in allen Fachrichtungen. Sie bei ihrer weiteren Karriere zu unterstützen, ist ein wichtiges Anliegen. AcademiaNet bietet den Wissenschaftlerinnen die große Chance, ihre Kompetenzen noch besser und sichtbarer als bisher in den Wissenschaftsbetrieb einzubringen.«

Dr. Angela Merkel

Robert Bosch Stiftung

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Eine Initiative der Robert Bosch Stiftung
in Kooperation mit Spektrum der Wissenschaft

Die ferne Zukunft der Sterne

Manche meinen, die glorreichen Tage des Universums seien bereits vorbei – doch weit gefehlt! In den kommenden Milliarden und Billionen Jahren werden völlig neue Himmelsphänomene in Erscheinung treten.

Von Donald Goldsmith

Diese Galaxien kollidieren gerade miteinander – ein Schicksal, das dereinst auch der Milchstraße bevorsteht.

KENN BROWN, MONDOLITHIC STUDIOS

Wie sieht die Zukunft des Kosmos aus? Auf den ersten Blick wirken die Aussichten für uns Menschen düster: In fünf Milliarden Jahren bläht sich die Sonne zu einem Roten Riesen auf und verschlingt dabei das innere Sonnensystem – bevor sie selbst langsam verglimmt. Doch dieser Zeitrahmen erfasst nur einen winzigen Teil – genau genommen einen unendlich kleinen Teil – der gesamten, aus heutiger Sicht unendlich langen Zukunft.

Wenn die Astronomen weit in die Zukunft blicken, etwa für »576 000 Millionen Jahre«, wie es Douglas Adams in seiner Sciencefiction-Satire »Das Restaurant am Ende des Universums« macht, dann ist das Weltall kaum noch wiederzuerkennen. In solch fernen Zeiten hat die beschleunigte Expansion des Kosmos bereits alles, was sich außerhalb der Galaxis befindet, außer Sichtweite befördert und so den Nachthimmel zunehmend geleert. Der britische Schriftsteller Lord Byron beschrieb die Vorstellung einer solchen himmlischen Ödnis 1816 in seinem Gedicht »Darkness«: »The bright sun was extinguish'd, and the stars / Did wander darkling in the eternal space.« (etwa: »Die helle Sonne war erloschen, und die Sterne / wanderten dunkler werdend durch ewigen Raum.«)

Doch es gibt auch gute Nachrichten, denn die drohende Dunkelheit stellt nur die halbe Wahrheit dar. Zwar ist die glorreiche Epoche der massenhaften Sternentstehung schon lange vorüber, aber das Universum ist immer noch lebendig. Im Zoo der astronomischen Objekte werden merkwürdige neue Körper auftauchen. Fremdartige Phänomene, die heute noch extrem selten sind, wenn es sie überhaupt gibt, werden irgendwann zum Normalfall. Auch lebensfreundliche Bedingungen werden im künftigen Kosmos häufiger anzutreffen sein als im heutigen.

Die wissenschaftliche Eschatologie (wörtlich: Die Lehre von den letzten Dingen) – vor allem die Untersuchung der fernen Zukunft – hat in Kosmologie und Physik Tradition. Schon für sich allein genommen handelt es sich um ein faszinierendes Forschungsgebiet, aber es hat noch mehr zu bieten: Die ferne Zukunft ist ein Testgelände für neue Theorien und bietet Möglichkeiten, abstrakte Vorstellungen zu konkretisieren. Dazu zählt etwa die Geometrie des Raums. Sie wird greifbarer, wenn Kosmologen schildern, was sie für das Schicksal des Kosmos bedeutet.

Um scheinbar unvereinbare Theorien über Elementarteilchen und fundamentale Naturkräfte miteinander zu versöhnen, prognostizieren Physiker Vorgänge, die erst nach Billionen von Jahren oder noch längeren Zeiträumen auftreten, wie etwa den Zerfall der Protonen oder das Verdampfen Schwarzer Löcher. Im vergangenen Jahrzehnt untersuchten Astrophysiker anhand von Modellen,

wie sich Entstehungsprozesse und chemische Zusammensetzung von Sternen und Galaxien seit dem Urknall verändert haben. Dieses Wissen über die Vergangenheit erlaubt ihnen nun, die Trends in eine ferne Zukunft zu extrapolieren.

Gregory Laughlin von der University of California in Santa Cruz ist Experte für die Entstehung von Sternen. Bereits als Doktorand beschäftigte sich der Astrophysiker mit der Entwicklung extrem massearmer Sterne. Er vergaß jedoch, in sein Simulationsprogramm die Bedingung einzubauen, dass es bei Erreichen des gegenwärtigen Weltalters anhält. So lief die Berechnung immer weiter, für Billionen Jahre in die Zukunft. Wie sich später herausstellte, kamen dabei zwar völlig verkehrte Resultate heraus – aber diese weckten dennoch Laughlins Interesse am weiteren Schicksal des Universums.

Sterne werden in interstellaren Wolken aus Gas und Staub geboren, die die hundertausendfache bis mehrmillionenfache Masse der Sonne enthalten. Überall in der Milchstraße haben sich in solchen stellaren Kreißsälen bereits einige hundert Milliarden dieser Objekte gebildet – und es werden noch einige zehn Milliarden hinzukommen. Doch der Vorrat an Rohmaterial für neue Sterne geht allmählich zur Neige. Die massereicheren unter ihnen explodieren zwar als Supernova und geben so einen Teil ihrer Materie an den interstellaren Raum zurück. Zudem strömt Gas aus dem intergalaktischen Raum in Galaxien hinein. Doch das reicht nicht aus, um all die in Sternen gebundene Materie zu ersetzen. Die Gesamtmasse des interstellaren Gases in der Galaxis beträgt derzeit nur noch etwa ein Zehntel der Gesamtmasse der Himmelskörper.

Die gegenwärtig pro Jahr in der Milchstraße entstehenden Sterne kommen insgesamt auf etwa eine Sonnenmasse. Zum Höhepunkt ihrer Produktion, vor acht bis zehn Milliarden Jahren, lag dieser Wert mindestens zehnmal höher. Gregory Laughlin schätzt, dass die Geburtenrate künftig in jedem Zehnfachen der vorherigen Zeitspanne weiter auf jeweils ein Zehntel absinken wird. In 100 Milliarden Jahren wird sie also nur noch ein Zehntel des heutigen Werts betragen, in einer Billion Jahren nur noch ein Hundertstel.

Doch dramatische Veränderungen können den Marsch in die stellare Dunkelheit unterbrechen. Unsere Milchstraße beispielsweise wird schon vergleichsweise bald – in wenigen Milliarden Jahren – mit der Andromeda-Galaxie kollidieren, der uns am nächsten liegenden großen Spiralgalaxie. Die dichten Zentralregionen der beiden Systeme verschmelzen dann entweder miteinander, oder sie beginnen, ihr gemeinsames Massenzentrum zu umkreisen. Interstellares Gas und Staub werden bei der Entstehung von »Milchomeda« kräftig durcheinandergewirbelt, und dadurch flammt die Sternentstehung zeitweise noch einmal auf. Astronomen nennen

AUF EINEN BLICK

REISE ANS ENDE DER WELT

1 Die große Zeit der **Galaxien- und Sternentstehung** ist zwar vorüber, doch im Universum geht es auch weiterhin lebhaft zu. In der Zukunft wird sich das Erscheinungsbild der Sterne verändern, da ihre chemische Zusammensetzung wechselt. Sterne und Planetensysteme werden vergehen.

2 Jetzt noch seltene Himmelsobjekte werden in immer größerer Zahl auftreten, wie etwa **Weiße Zwerge aus Helium**. In mancherlei Hinsicht könnte der Kosmos der Zukunft sogar lebensfreundlicher sein als der heutige.

3 Es ist aber nicht nur die Zukunft des Kosmos selbst, die für Wissenschaftler von Interesse ist. Die ferne Zukunft ist darüber hinaus eine intellektuelle Spielwiese, auf der die Forscher die Folgen ihrer **Theorien und Beobachtungen** erproben können.

Kosmische Geschichte

Nach der Raserei seiner Geburt entwickelt sich der reife Kosmos nur langsam. Noch rund 100 Milliarden Jahre lang – fast das Zehnfache des heutigen Weltalters – werden weiterhin Sterne entstehen. Damit steht ausreichend Zeit für sich nur langsam herausbildende kosmische Phänomene zur Verfügung.

10^{-32} Sekunden	10^{-6} Sekunden	100 Sekunden	100 Millionen Jahre	500 Millionen Jahre	4 Milliarden Jahre	8 Milliarden Jahre	9 Milliarden Jahre
Ende der kosmischen Inflation	Entstehung der Protonen	Deuterium, Helium und Lithium entstehen durch Nukleosynthese.	Erste Sterne bilden sich.	nach derzeitigem Wissensstand früheste Galaxie	Maximum der Sternentstehung	Die kosmische Expansion beginnt sich zu beschleunigen.	Geburt des Sonnensystems

so etwas einen »Starburst«, die explosionsartige Entstehung neuer Himmelskörper. Sobald sich diese Aktivität abschwächt, ähnelt das verschmolzene System immer mehr einer Elliptischen Galaxie, also einem reifen Sternsystem mit nur noch wenig Rohmaterial für die Bildung neuer Objekte und dementsprechend niedriger Entstehungsrate.

Bessere Aussichten für das Leben

Es werden sich aber nicht nur weniger Sterne bilden – sie werden einem anderen Typ angehören, weil sich künftig ihr Ausgangssubstrat umwandelt. Im feurigen Urknall wurden nur die leichtesten chemischen Elemente produziert, also Wasserstoff, Helium und Lithium. Alle schwereren Elemente entstehen erst durch Kernfusion in Sternen – und zwar überwiegend am Ende ihres Lebens: in Roten Riesen, die ihre Hüllen abstoßen, oder bei Supernova-Explosionen. Rote Riesen liefern die leichteren und häufigeren unter den schwereren Elementen, vor allem Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff.

Supernovae dagegen produzieren weitere Elemente bis hin zum Uran. Diese vermischen sich mit dem vorhandenen interstellaren Gas – und starten damit die nächste Sternengeneration mit mehr schweren Elementen als die vorherige. Die Sonne, mit fünf Milliarden Jahren vergleichsweise jung, enthält 100-mal so viele schwere Elemente wie die vor zehn Milliarden Jahren entstandenen Sterne. Tatsächlich finden sich in einigen der ältesten fast überhaupt keine dieser Substanzen. Künftige Sterngenerationen werden noch mehr damit angereichert sein, was die internen physikalischen Abläufe wie ihr Erscheinungsbild verändert.

Im Wesentlichen hat das zwei Auswirkungen auf die neugeborenen Sterne:

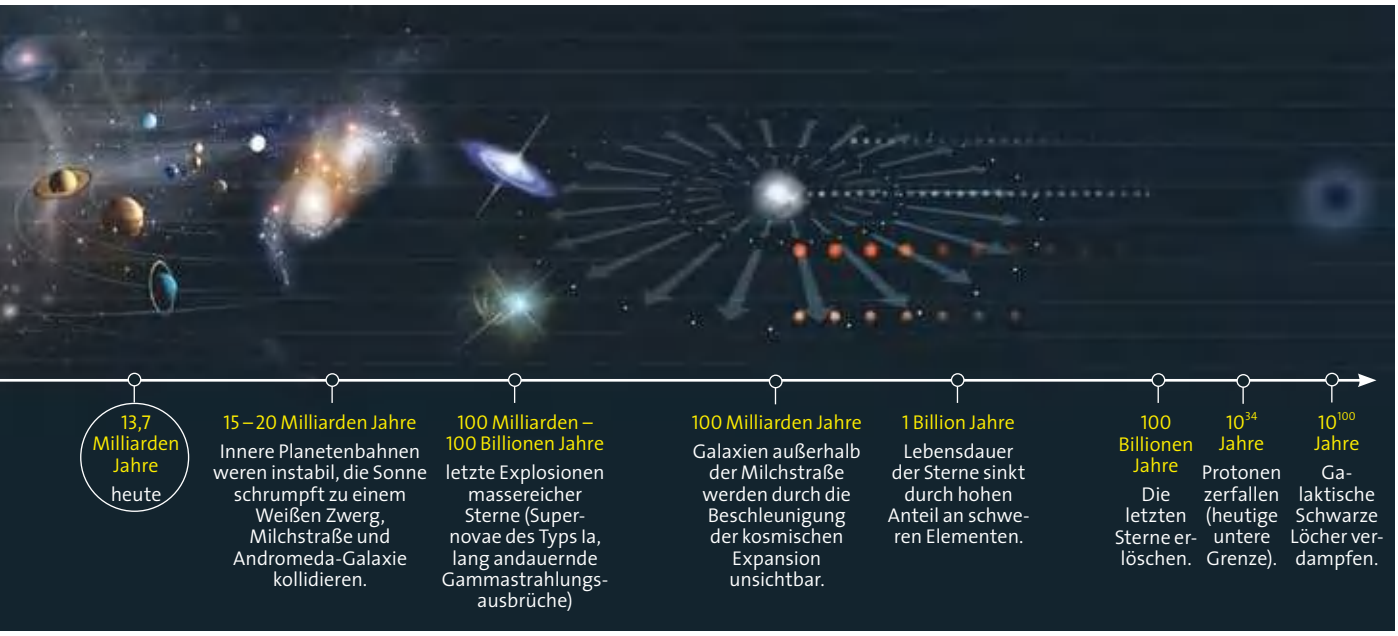
➤ Erstens verringert es die Strahlungsdurchlässigkeit ihrer Außenschichten. Wasserstoff und Helium sind fast transparent, doch schon eine kleine Beimischung schwererer Elemente führt zur Absorption von Strahlung und verringert so die Leuchtkraft des Sterns. Da im Inneren eines Sterns ein Kräftegleichgewicht herrschen muss, reduziert sich die Energieerzeugung, weshalb sich der nukleare Brennstoffvorrat langsamer verbraucht. Gäbe es nur diesen Effekt, so würden Sterne umso länger leben, je mehr schwere Elemente sie enthalten.

➤ Der zweite Effekt wirkt dem ersten entgegen: Schwere Elemente sind für die Energieproduktion nutzlos – sie nehmen an der Kernfusion nicht teil, verringern den verfügbaren Brennstoff und dadurch auch die Lebensdauer eines Sterns.

Diese beiden Aspekte haben zuerst Greg Laughlin und sein Astrophysikkollege Fred Adams von der University of Michigan 1997 untersucht. Demnach dominiert der erste Effekt für die nächsten 1000 Milliarden Jahre. In dieser Zeit verlängern die schweren Elemente durchaus die Lebensdauer der Sterne. Irgendwann machen sie aber einen signifikanten Anteil der Masse aus, und die Wirkung kehrt sich um. Der kritische Zeitpunkt wird etwa beim Vierfachen des heutigen Werts erreicht sein.

Die zusätzlichen Elemente sollten auch bei der Entstehung von Planeten helfen und somit die Aussichten für Leben verbessern. Astronomen haben dazu die Elementhäufigkeiten in den Sternen untersucht, bei denen Planeten entdeckt worden sind. Ihre Analyse zeigt, dass bei einem höheren Anteil schwerer Elemente auch vermehrt Planeten vorkommen.

»Jupiterähnliche Planeten zeigen definitiv eine Korrelation [mit der Häufigkeit schwerer Elemente]«, sagt John Johnson, Experte für Exoplaneten vom California Institute of Technology. »Da das interstellare Medium stetig [mit diesen Substanzen] angereichert wird, wächst möglicherweise auch die Häufigkeit von Planeten.«



Und was ist mit erdähnlichen Planeten? Die Sammlung entsprechender Beobachtungen von Weltraumteleskopen steckt erst in den Anfängen. Aber da sie fast vollständig aus schweren Elementen bestehen, sollte der Effekt bei ihnen sogar noch stärker auftreten – das Universum der Zukunft dürfte mit Planeten angefüllt sein. Obwohl neue Sterne immer seltener entstehen, wird wohl etwa ein Drittel bis die Hälfte aller Planeten, die jemals existieren, erst noch geboren!

Auf den ersten Blick erscheint diese Zunahme nicht unbedingt als ein Vorteil für die Entstehung von Leben. Denn die meisten Sterne der Zukunft werden deutlich masseärmer und leuchtschwächer sein als unsere Sonne. Doch glücklicherweise können auch solche Himmelskörper lebensfreundliche Bedingungen bieten. Zum Beispiel können Sterne mit nur mit einem Promille der Sonnenleuchtkraft Trabanten auf sehr engen Umlaufbahnen besitzen, deren Temperaturen flüssiges Wasser ermöglichen, vermutlich die Hauptbedingung für die Lebensentstehung.

Planeten treten künftig nicht nur häufiger, sondern sie enthalten auch mehr lebensförderliche chemische Elemente. Denn zumindest die Organismen auf der Erde brauchen nicht nur Wasser, sondern auch Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff. Im Lauf der Zeit sollte der wachsende Anteil an diesen Elementen die Planeten also lebensfreundlicher machen. Während einerseits immer weniger Sterne entstehen, sollten diese andererseits immer häufiger auch auf potenziell Leben tragende Planeten herabscheinen. Unabhängig davon, wie viel Leben es im heutigen Universum gibt – in der Zukunft wird es vermutlich mehr und unterschiedlichere Lebensformen geben.

Wie stabil ist das Sonnensystem?

In ferner Zukunft werden Planetensysteme so lange existieren, dass völlig neue Aspekte ins Spiel kommen. Zwar nehmen wir heute die Stabilität unseres Sonnensystems als selbstverständlich hin – wir befürchten also nicht, dass die Bewegung der Erde chaotisch wird und sie vielleicht mit einem Nachbarplaneten kollidiert. Doch diese Zuversicht löst sich auf, wenn wir in Dimensionen von mehreren Milliarden Jahren denken. Im Jahr 2009 führten die Himmelsforscher Jacques Laskar und Mickael Gastineau von der Sternwarte Paris mehrere tausend Computersimulationen der vier inneren Planeten zum Stabilitätsproblem durch. Dabei variierten sie die Anfangsbedingungen der Bahnen um winzige Beträge, zum Teil nur um wenige Meter. Resultat: Im Verlauf von Billionen Jahren werden planetare Kollisionen ziemlich wahrscheinlich. Schon innerhalb von fünf Milliarden Jahren stoßen mit einem Prozent Wahrscheinlichkeit die Nachbarplaneten Merkur und Venus zusammen.

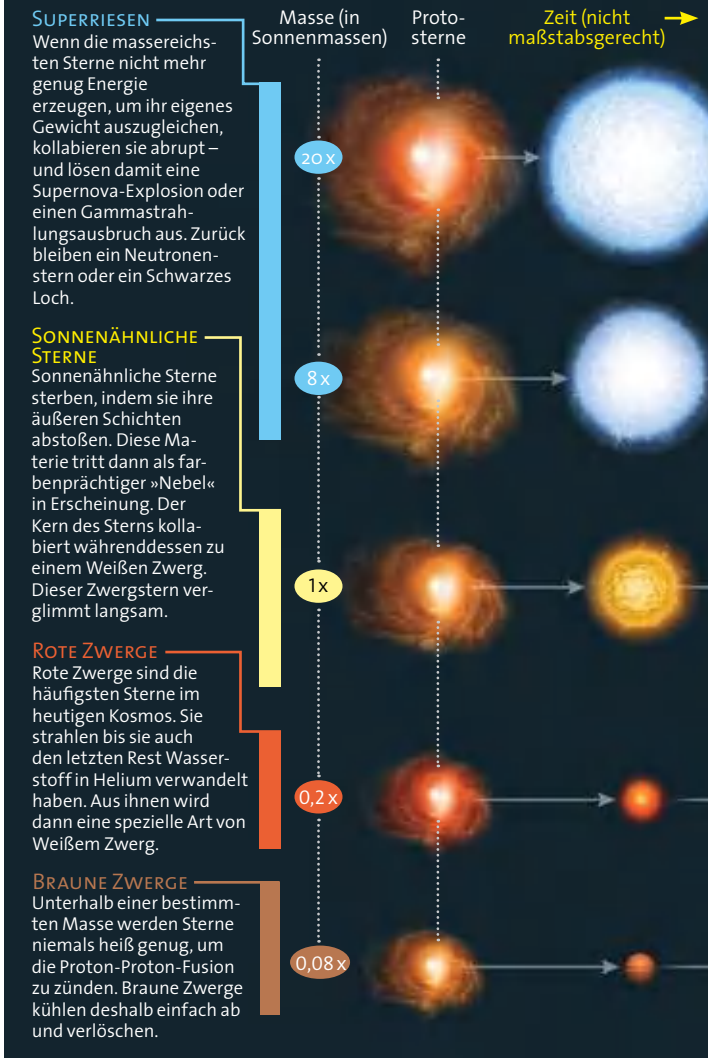
Zudem wird dann die ganze Milchstraße kräftig durcheinandergewirbelt, sobald die Andromeda-Galaxie mit ihr verschmilzt. Das verändert das galaktische Gravitationsfeld und führt möglicherweise zu einer völligen Umstrukturierung des Sonnensystems. Greg Laughlin meint dazu: »Was wir nun noch verstehen müssen, ist, inwieweit die Hand des

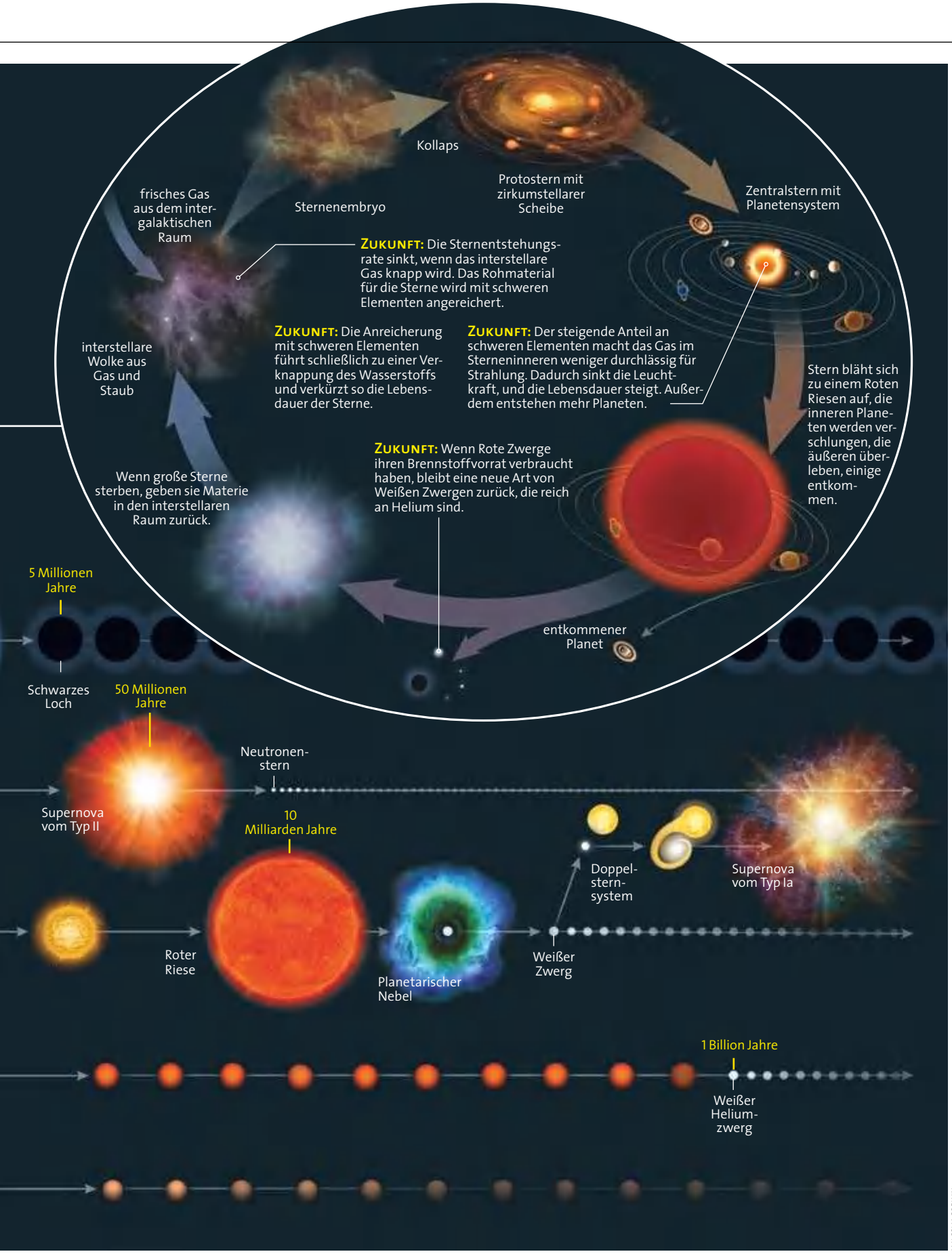
Die Zukunft der Sternentwicklung

Betrachtet man nur die reine Leuchtkraft, so liegen die glorreichen Tage des Kosmos bereits hinter uns. Doch auf subtile Art bleibt das Universum noch für Billionen von Jahren interessant. Rote Zwerge, heutzutage der häufigste Sterntyp, stehen gerade erst am Anfang ihres langen Lebens – und sie werden sich schließlich zu einer neuen Art von Himmelskörpern entwickeln. Spätere Generationen von Sternen enthalten die schweren Elemente, die in ihren Vorgängern entstanden sind – und das verändert Erscheinungsbild und Lebensdauer. Über riesige Zeiträume hinweg spielen seltene Prozesse, wie beispielsweise direkte Zusammenstöße zwischen Sternen, eine immer größere Rolle.

Langsam und gleichmässig – so gewinnt man das kosmische Rennen

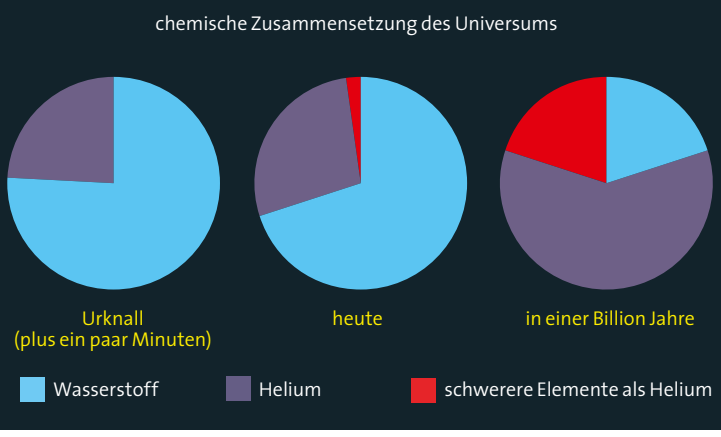
Die Lebensdauer von Sternen folgt einer einfachen Regel: Je mehr Masse, desto kürzer das Leben. Massereiche Sterne besitzen mehr Brennstoff, aber sie verbrauchen diesen auch erheblich schneller – und dann vergehen sie mit einem Knall. Da sie nur für einen kosmischen Augenblick leben, gehört die Zukunft masseärmeren, langlebigeren Sternen.




Kollaps
frisches Gas aus dem intergalaktischen Raum
Sternenembryo
Protostern mit zirkumstellarer Scheibe
Zentralstern mit Planetensystem
ZUKUNFT: Die Sternentstehungsrate sinkt, wenn das interstellare Gas knapp wird. Das Rohmaterial für die Sterne wird mit schweren Elementen angereichert.
interstellare Wolke aus Gas und Staub
ZUKUNFT: Die Anreicherung mit schweren Elementen führt schließlich zu einer Verknappung des Wasserstoffs und verkürzt so die Lebensdauer der Sterne.
ZUKUNFT: Der steigende Anteil an schweren Elementen macht das Gas im Sterneninneren weniger durchlässig für Strahlung. Dadurch sinkt die Leuchtkraft, und die Lebensdauer steigt. Außerdem entstehen mehr Planeten.
Stern bläht sich zu einem Roten Riesen auf, die inneren Planeten werden verschlungen, die äußeren überleben, einige entkommen.
ZUKUNFT: Wenn Rote Zwerge ihren Brennstoffvorrat verbraucht haben, bleibt eine neue Art von Weißen Zwergen zurück, die reich an Helium sind.
Wenn große Sterne sterben, geben sie Materie in den interstellaren Raum zurück.
entkommener Planet
5 Millionen Jahre
Schwarzes Loch
50 Millionen Jahre
Neutronenstern
Supernova vom Typ II
10 Milliarden Jahre
Doppelsternsystem
Supernova vom Typ Ia
Roter Riese
Planetarischer Nebel
Weißer Zwerg
1 Billion Jahre
Weißer Heliumzwerg
MALCOLM GODWIN

Die künftige chemische Zusammensetzung der Sterne

Sterne leuchten, weil sie Wasserstoff zu Helium fusionieren und, am Ende ihres Lebens, Helium zu noch schwereren Elementen. Jede Generation von Sternen beginnt mit einem größeren Anteil an schweren Elementen als die vorherige. Dieser Prozess führt zu einer langsamen Veränderung des Erscheinungsbilds und der Lebensdauer der Sterne. Er könnte außerdem zu einer Zunahme der Zahl der Planeten führen, die mit den Sternen zusammen entstehen.



Chaos, die unser Sonnensystem heute nur leicht berührt, die galaktische Planetenstatistik beeinflusst.«

Ein ähnliches Chaos wie in den Planetensystemen tritt auch auf größeren Skalen in Erscheinung. Sterne in Doppel- und Mehrfachsystemen umkreisen wegen ihrer gegenseitigen Anziehung den gemeinsamen Massenschwerpunkt. Das gilt ebenso für Sternhaufen und Galaxien. In all diesen Gebilden geraten Sterne praktisch nie in direkten Kontakt miteinander – sie sind einfach zu weit voneinander entfernt, selbst als astronomische Nachbarn.

Doch in kosmologisch großen Zeiträumen wird aus »praktisch nie« oft ein »manchmal« und schließlich sogar ein »nahezu immer«. So wird jedes Doppelsternsystem irgendwann durch externe Gravitationskräfte zerrissen, oder es verliert durch die Abstrahlung von Gravitationswellen an Energie, worauf ihre Körper zusammenstoßen. Weite Doppelsterne werden eher auseinanderdriften, enge dagegen kollabieren.

Verschmelzen zwei Sterne miteinander, können sie zeitweilig einen massereicheren, leuchtkräftigeren Stern bilden. Auch ein Planet von Jupiterformat kann, sobald er mit seinem Muttergestirn fusioniert, einen ähnlichen, wenngleich schwächeren Einfluss ausüben. Nehmen wir einen bescheidenen Stern mit einem Zehntel der Sonnenmasse, der von einem jupiterähnlichen Planeten umkreist wird. Hat dieser eine Umlaufzeit von mehr als ein paar Tagen, wird er irgendwann das System verlassen. Bewegt er sich aber auf einer engeren Bahn, kann er in den Stern stürzen und diesem so einen frischen Vorrat an Wasserstoff zuführen. Das würde zu einer kurzzeitigen, aber dramatischen Erhöhung des Energieausstoßes führen, die als supernovaähnlicher Ausbruch sichtbar wird.

In ferner Zukunft wird solches Aufflackern das langsame Verschwinden der Sterne begleiten. Selbst in einer Billion Jahren können Astronomen der Zukunft also noch seltsame Phänomene bei der sich ausdünnenden Sternpopulation ihrer Heimatgalaxien beobachten.

In 10 oder 100 Milliarden Jahren wird trotz sinkender Entstehungsrate immer noch eine immense Anzahl von Sternen leuchten – hauptsächlich Himmelskörper mit niedrigen Massen und damit extrem hoher Lebenserwartung. Denn Sterne mit großer Masse sind so leuchtkräftig, dass sie schnell ausbrennen und schon nach wenigen Millionen Jahren explodieren. Sterne mit deutlich geringerer Masse als unsere Sonne können dagegen viele hundert Milliarden oder gar Billionen Jahre lang leuchten. Sie verbrauchen ihren Brennstoffvorrat so langsam, dass er trotz seiner geringen Menge für immense Zeiträume ausreicht.

Schwerer Stern, kurzes Leben

Je nach Masse variiert auch ihr finales Schicksal. Die Sonne als stellares Mittelgewicht wird sich einst zu einem Roten Riesen aufblähen und ihre Außenschichten ins All abstoßen. Zurückbleiben wird ein Weißer Zwerg: ein dichter, erdgroßer Sternenleichnam, der nahezu vollständig aus Kohlenstoffatomkernen und Elektronen besteht.

In Sternen mit weniger als der Hälfte der Sonnenmasse bleibt die Temperatur im Zentrum zu gering, um jene Kernfusionsreaktionen auszulösen, die einen Roten Riesen entstehen lassen. Stattdessen werden diese Objekte später, so spekulieren die Astronomen, zu Weißen Zwergen, die fast nur aus Helium bestehen. Im heutigen Universum entstehen solche Sterne nur gelegentlich, und zwar wenn sie sich in einem engen Doppelsystem gegenseitig die Hüllen entreißen, bevor ihr Heliumzentrum zünden kann. Einen isoliert entstandenen Weißen Heliumzwerg haben die Astronomen bislang nicht gefunden. Seit dem Urknall ist dafür einfach noch nicht genug Zeit verstrichen. Damit liefert er ein herausragendes Beispiel für jene neuen Phänomene, die unsere Nachfahren eines fernen Tages erstmals beobachten könnten.

Sterne mit größeren Massen sterben einen dramatischeren Tod. Ihr Zentrum kollabiert zu einem Neutronenstern oder einem Schwarzen Loch. Dies löst eine Stoßwelle aus,

was die Außenschichten des Sterns ins All schleudert, welche dann als Supernova aufleuchten. Wenn die massereichen Sterne vom Himmel verschwunden sind, ist es auch vorbei mit all diesen Explosionen, die derzeit regelmäßig die Galaxien überstrahlen. Doch eine andere Supernova-Art (»Typ Ia«) wird auch weiterhin gelegentlich den Himmel erhellen. Zu solchen Eruptionen kommt es in Doppelsternsystemen, bei denen sich einer der Sterne bereits zu einem Weißen Zwerg entwickelt hat. Bei einigen dieser Paare strömt dabei gemäß Modellrechnungen wasserstoffreiche Materie vom zweiten Stern zum Weißen Zwerg. Das Gas akkumuliert auf dessen Oberfläche, bis Kernfusionsreaktionen einsetzen und der Stern als Supernova explodiert. Solche Ereignisse sind so lange möglich, wie ausreichend massereiche Sterne existieren, also grob geschätzt noch die nächsten 100 Milliarden Jahre.

In einem ähnlichen Supernova-Modell, das gleichfalls auf Doppelsternen beruht, umkreisen sich zwei Weiße Zwerge auf extrem engen Bahnen. Das System sendet Gravitationswellen aus und verliert so Bahnenergie. Dadurch schrumpfen die Umlaufbahnen, und die Sterne bewegen sich spiralförmig aufeinander zu, bis sie in einem kurzen finalen Crash miteinander verschmelzen. Solche Ereignisse könnten sogar noch in Billionen von Jahren auftreten.

Heller als Supernovae sind Gammastrahlungsausbrüche. Es gibt zwei unterschiedliche Arten dieser Megaexplosionen, die offenbar auch auf ganz verschiedene Weise entstehen:

- Lang andauernde Gammaausbrüche, die höchst energiereiche Strahlung mehr als zwei Sekunden lang aussenden, entstehen vermutlich, wenn der Kern eines massereichen Sterns zu einem Neutronenstern wird.
- Kurze Gammaausbrüche von weniger als zwei Sekunden Dauer sind wahrscheinlich die Folge der Verschmelzung zweier Neutronensterne oder eines Neutronensterns mit einem Schwarzen Loch.

Die lange Variante wird im Verlauf der Äonen immer seltener, da sich immer weniger massereiche Sterne bilden. Die kurzen Ereignisse können dagegen noch in Billionen von Jahren den Kosmos mit energiereicher Strahlung überschütten.

Wenn wir die kosmische Zeit nicht mehr in Milliarden, sondern in Billionen von Jahren messen, dann gelangen wir in eine Epoche des Universums, in der keine neuen Sterne mehr entstehen. Alle außer denen mit ganz geringer Masse sind längst ausgebrannt, explodiert oder verglimmen als Weiße Zwerge. Abgesehen von der Dunklen Materie, deren Zusammensetzung immer noch ein Geheimnis ist, enthält die Milchstraße – ebenso wie andere Galaxien – in dieser fernen Zukunft in erster Linie Schwarze Löcher, Neutronensterne, Weiße Zwerge und einige rote Sterne. Letztere leuchten jedoch so schwach, dass kein einziger von ihnen ohne Fernrohr zu sehen wäre, selbst wenn sie uns so nahe wären wie heute der nächste Nachbarstern. Doch selbst die allmählich verlöschenden Objekte produzieren von Zeit zu Zeit noch enorme Strahlungsausbrüche – eine Erinnerung an das nukleare Inferno, das einst den Himmel mit Milliarden von Sternen spickte.

Wenn die überlebenden Sterne Planeten auf engen Umlaufbahnen besitzen, dann könnte auf diesen langfristig flüssiges Wasser und damit auch Leben existieren. Dieses überdauert dann womöglich Zeiträume, die jede Vorstellungskraft sprengen, solange sie jedenfalls nicht Opfer einer nahen Supernova oder eines Gammastrahlungsausbruchs werden.

Das führt uns zu einer offenen Frage: Könnte eine hoch entwickelte Zivilisation – sofern sie existiert und fortbesteht – den Verlauf der kosmischen Geschichte beeinflussen? Schon vor über 30 Jahren hat sich Freeman Dyson vom Institute for Advanced Study in Princeton mit dieser Frage auseinandergesetzt. »Ich glaube, es gibt gute wissenschaftliche Gründe dafür«, schrieb der theoretische Physiker, »die Möglichkeit ernst zu nehmen, dass Leben und Intelligenz dieses Universum erfolgreich nach ihren Bedürfnissen formen können.« Heute, gerade mal 14 Milliarden Jahre nach dem Urknall, gibt es allerdings kaum Hinweise darauf, dass Lebensformen den Kosmos in größerem Maßstab beeinflusst haben. Aber der Zug der Zeit hat den Bahnhof erst verlassen. In ferner Zukunft ist Überleben nur möglich, wenn das Leben größere Teile der kosmischen Ressourcen beherrscht.

Da wir nur einen winzigen Ausschnitt der langen Reise direkt beobachten können, werden wir keine absolute Sicherheit darüber erhalten, was künftig geschieht. Doch unser freier Geist kann so weit in die ferne Zukunft schweifen, wie wir wollen. Oder, wie der englisch-amerikanische Schriftsteller Wystan H. Auden 1957 in einem Gedicht schrieb: »Were all stars to disappear or die / I should learn to look at an empty sky / And feel its total darkness sublime / Though this might take me a little time.« – »Würden alle Sterne verschwinden oder sterben / so müsste ich lernen, an einen leeren Himmel zu schauen / und die Erhabenheit seiner völligen Dunkelheit zu spüren / auch wenn ich dafür eine Weile bräuchte.« ~

DER AUTOR

Donald Goldsmith ist möglicherweise der einzige Astronom, der früher als Anwalt für Steuerrecht gearbeitet hat. Diese Karriere war zwar lukrativ, aber kurzlebig. Er promovierte 1969 an der University of California in Berkeley und war als Berater für die Fernsehserie »Cosmos« von Carl Sagan tätig.

QUELLEN

Adams, F., Laughlin, G.: The Five Ages of the Universe – Inside the Physics of Eternity. Free Press, Washington D. C. 2000
Chiappini, C.: The Formation and Evolution of the Milky Way. In: American Scientist 89, S. 506–515, November/Dezember 2001
Goldsmith, D.: The Runaway Universe – The Race to find the Future of the Cosmos. Basic Books, New York 2000

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1149648**

Hart wie ein Brett

Verpackt man körnige Lebensmittel unter Luftabschluss, leisten sie erbitterten Widerstand gegen jegliche Verformung.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

> Schließlich ist das Einzige, was wir uns dem unbegrenzten Raum zum Trotz ausdenken können, die Kunst der Konzentration, der Sammlung, der Einnahme einer möglichst geringen Oberfläche.
>
> *Andrzej Stasiuk (* 1960)*

Jeder von uns hat wohl schon mal einige Mühe darauf verwendet, etwa Erdnüsse oder Kaffee aus ihren eng anliegenden Vakuumverpackungen zu befreien. Und viele werden sich dabei gewundert haben, warum sich die Verpackung bretthart anfühlt, obwohl sie aus schlichter luftdichter Kunststofffolie besteht (siehe Foto rechts). Das ist keine Absicht der Hersteller, sondern nur eine Nebenwirkung. Tatsächlich geht es darum, dass sich Lebensmittel unter Luftabschluss länger frisch halten. Ohne Sauerstoff bleiben Oxidationsvorgänge aus, welche die Alterung des Inhalts beschleunigen.

Woher aber stammt der hartnäckige Widerstand der Verpackung gegen jede Art von Verformung? Schließlich liegen Erdnüsse und Kaffeepulver granular vor, also in körniger Form, und müssten daher leicht gegeneinander verschiebbar sein. Versuchen wir also, die Geheimnisse der Granulate zu entschlüsseln. Füllt man beispielsweise gemahlenen Kaffee aus seiner Vakuumverpackung in einen schlanken Behälter um, gewinnt man den Eindruck, dass das Volumen des Pulvers dabei zunimmt. Durch Rütteln oder leichtes Klopfen am Behälter sackt das Granulat aber wieder in sich zusammen und lässt sich auf diese Weise beträchtlich verdichten. Bei Kaffee lässt sich das ebenso beobachten wie bei Getreide, Pulver, Sand oder selbst bei größeren Mengen an metallenen Schrauben. Daher rührt auch der Ausdruck des »gerüttelt Maß«. Als Getreide noch nicht gewogen, sondern mit Hohlmaßen wie dem Scheffel gemessen wurde, zeichnete sich der ehrliche Kaufmann dadurch aus, dass er das Gefäß immer wieder gut rüttelte. So fand dann mehr Getreide Platz, als wenn er es nur locker hineingeschüttet hätte.

Hart wie ein Brett fühlen sich vakuumverpackte Erdnüsse an. Die »granulare Materie« wird erst wieder locker, wenn man in die Verpackung sticht.

Wenn aber alles Rütteln und Schütteln zu keiner weiteren Volumenabnahme führt, liegt die dichteste Packung vor (zur Diskussion des Begriffs siehe SdW 2/2012, S. 68). Jede weitere Verformung geht dann wieder mit einer Volumenzunahme einher. Im Fall gleich großer Kugeln ist die dichteste Packung dann erreicht, wenn sich die Kugeln in einer hexagonalen Anordnung zusammenfinden. In einem dreidimensionalen Gitter ist dabei jede Kugel – mit Ausnahme jener am Rand des Gitters – von zwölf nächsten Nachbarn umgeben. Neben dieser hexagonal dichtesten Kugelpackung gibt es weitere, die zwar ebenfalls regelmäßig sind, gleichwohl aber ein größeres Volumen beanspruchen – etwa das einfach kubische Gitter, in dem jede Kugel von sechs nächsten Nachbarn umgeben ist.

Veranschaulichen lässt sich die durch dichtere Packung erreichbare Volumenabnahme ganz spielerisch. Die Aufgabe besteht darin, ein zweidimensionales Gitter aus Münzen, das stellvertretend für ein kubisches Gitter steht, so umzuordnen, dass auf derselben Fläche eine zusätzliche Münze Platz findet. Das gelingt nur, wenn man zu der dichtesten, eben der hexagonalen Packung übergeht (siehe Fotos unten). Solche so genannten strukturellen Phasenübergänge kommen in der Natur tatsächlich vor, etwa beim dreidimensionalen Aufbau von Molekülen. Ein bekanntes Beispiel ist der Übergang von der Graphit- zur Diamantstruktur.

Findet das zusätzliche Geldstück auf der Fläche noch Platz? Dazu muss man die Münzen in die dichteste Packung (rechts) umlagern, so dass sich die Zwischenräume verkleinern.

ALLE FOTOS: H.-J. SCHLICHTING

Ein mit trockenem Sand gefüllter Luftballon lässt sich wie Knetgummi dauerhaft verformen – obwohl man erwarten könnte, dass die leicht gegeneinander verschiebbaren Sandkörner von selbst wieder die energetisch optimale Kugelform annehmen.

Doch weder Erdnuss- noch Kaffeevorräte bestehen aus identischen Kugeln. Dennoch können wir Ähnliches beobachten. Die Granulate werden beim Verpackungsvorgang nämlich zunächst gerüttelt, bis sie eine unter den gegebenen Bedingungen minimale Packung erreichen. Durch Luftentzug wird diese Konfiguration dann stabilisiert, denn jetzt presst der äußere Luftdruck die umhüllende Folie und damit die Granulatteilchen fest aneinander. Jede nun folgende Verformung der Verpackung hätte eine Verschiebung der Teilchen gegeneinander zur Folge. Sie würden damit die Minimalkonfiguration verlassen, was zwangsläufig mit einer Volumenzunahme verbunden wäre. Eine Verformung müsste also gegen den äußeren Luftdruck durchgesetzt werden. Wie schwer dieser auf Gegenständen lastet, demonstrierte schon 1654 Otto von Guericke mit den berühmten Magdeburger Halbkugeln. Mittels einer Pumpe hatte er aus den beiden zu einer Kugel zusammengefügten Hemisphären einen Großteil der Luft entfernt. Daraufhin reichte selbst die Kraft von 16 Pferden nicht mehr aus, um sie wieder voneinander zu trennen.

In der nichtlinearen Physik nennt man das Phänomen der Volumenzunahme infolge der Verformung verdichteter granularer Materie auch Dilatanz (dilatare: lateinisch für ausbreiten oder ausdehnen). Mit einem einfachen Versuch kann man ausprobieren und sogar im Wortsinn ein Gefühl dafür gewinnen, was dabei passiert (siehe Fotos oben). Man stopfe so lange trockenen Sand in einen Luftballon, bis er einen Durchmesser von etwa zehn Zentimetern annimmt. Der Ballon muss dabei mehrfach gedehnt werden, damit er weiteren Sand aufnehmen kann. Daraufhin verschließe man ihn so, dass er möglichst wenig Luft enthält.

Nun kann man den gefüllten Ballon zu einer Kugel formen, also zu derjenigen Gestalt, in der ein gegebenes Volumen die kleinste Oberfläche besitzt. Die Gummihaut des Ballons ist dann nur wenig gedehnt – ihre elastische Energie hat also, wie von der Natur stets angestrebt, den niedrigsten Wert erreicht. In diesem Zustand fühlt sich der enthaltene Sand weich an. Nun aber drücke man den Ballon zu einer Scheibe platt oder modelliere sogar eine Hohlform, die beide energetisch ungünstiger sind. Wegen der leichten Verschiebbarkeit der Sandkörner würde man darum erwarten, dass die gespannte Gummihaut Widerstand leistet und den Sand in die Kugelform zurückdrückt. Stattdessen tut sich eine irritierende Diskrepanz zwischen Fühlen und (vermeintlichem) Wissen auf. Denn das so erzeugte Gebilde besitzt hohe Stabilität – der sandgefüllte Ballon fühlt sich an wie Knetgummi, der jegliche Form stets beibehält.

Gedehnter Gummi und Luftdruck wirken zusammen

Wie kommt es dazu? Verformt man die Sandkugel, vergrößert man ihr Volumen. Da der Inhalt luftdicht von der Umgebung getrennt ist, kann das nur dadurch gelingen, dass die zwischen den Sandkörnern befindliche Luft verdünnt wird. Es entsteht also ein Unterdruck. Ab dann überwiegt der äußere Luftdruck und presst das Gebilde zusammen. Aber warum findet der Sand nicht einfach unter Verringerung seines Volumens von selbst in die Kugelform zurück? Weil die Sandkörnchen auch in der neuen Form auf Grund des allseitigen Drucks wieder die dichtestmögliche Packung eingenommen haben. Sie müssten also zunächst wieder ein wenig voneinander entfernt werden. Das unterbindet aber der Druck des gedehnten Gummis. Im Fall vakuumverpackter Granulate verschärft sich die Situation sogar noch. Denn deren Kunststoffhülle lässt sich kaum dehnen und widersetzt sich der Verformung darum wesentlich stärker.

Was also lehren uns vakuumverpackte Stoffe? Zumindest dieses: Die Natur verlässt nur ungern eine einmal eingenommene Minimalform. Allerdings ist es uns in der Regel ein Leichtes, die Randbedingungen zu verändern. Otto von Guericke öffnete einfach ein Ventil, durch das wieder Luft in die zusammengesetzte Kugel strömte. In unserem Fall genügt schon ein spitzes Messer, um zum Ziel zu gelangen.

DER AUTOR

H. Joachim Schlichting war bis 2011 Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. 2008 erhielt er für seine didaktischen Konzepte den Pohl-Preis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1149969

Die ersten Amerikaner

Die Hinweise mehren sich, dass Menschen die Neue Welt früher als bislang gedacht erreichten – und auch auf dem Seeweg dorthin kamen.

Von Heather Pringle

In der drückenden Hitze eines Junitags klettert der Archäologe Michael R. Waters in eine dunkle Grube, wo bereits einige Mitarbeiter des Center for the Study of the First Americans der Texas A&M University vorsichtig mit ihren Kellen im Boden graben. Einer von ihnen reicht Waters ein Stück Feuerstein. Der Forscher dreht den Fund hin und her und betrachtet ihn mit einer Lupe. Kaum größer als ein Daumennagel, erweist er sich als Bruchstück eines Schneidewerkzeugs. Vor langer Zeit an einem grasbewachsenen Flussufer weggeworfen, ist es nun eines von Tausenden von Artefakten, einer von unzähligen Spielsteinen in dem Puzzle der Besiedlung der Neuen Welt.

Waters, ein hochgewachsener Mann in den frühen Sechzigern, wirkt mit seiner bedächtigen Art nicht gerade wie ein Rebell. Dennoch trägt seine Arbeit dazu bei, das bis Ende der 1990er Jahre gültige Standardmodell zur Besiedlung der Neuen Welt zu Fall zu bringen: dass die ersten Amerikaner asiatische Großwildjäger gewesen seien, die Mammuts und anderen Herdentieren folgend Beringia überquert hatten – eine heute versunkene Landmasse, die Nordasien mit Alaska verband. Vor ungefähr 13 000 Jahren sollen die ersten Menschen amerikanischen Boden betreten haben, um dann durch einen eisfreien Korridor (siehe Karte S. 54/55) nach Süden vorzustoßen. Anhand ihrer charakteristischen Steinwerkzeuge bezeichnen Prähistoriker sie nach einem Fundort in New Mexico als Clovis.

Doch diese Hypothese ist vor einigen Jahren in Verruf geraten. In Monte Verde, einer Fundstelle im Süden Chiles, entdeckten der heute an der Vanderbilt University arbeitende Archäologe Thomas Dillehay und seine Kollegen bereits in den 1970er Jahren Spuren früher Amerikaner. Allerdings galt »Clovis first« als unumstößliche Lehrmeinung, so dass die Datierung erst 1997

ILLUSTRATION: TYLER JACOBSON

Gewaltige Gletscherzungen, aber auch eisfreie Tundren und Wälder – Nordamerikas Küste bot vermutlich schon vor 16 000 Jahren den ersten Siedlern gute Überlebenschancen.

nach sorgfältiger Überprüfung weit gehend anerkannt wurde. Demnach lagerten Jäger dort schon vor 14 600 Jahren, also lange vor der mutmaßlichen Ankunft der Clovis-Menschen in Alaska. Weil sie ein Feuchtgebiet durchstreiften, überdeckte später Torf die Fundschicht und bewahrte so Reste organischer Materialien vor dem weiteren Verfall. Deshalb wissen die Forscher, dass jene Menschen in fellbedeckten Zelten gewohnt und sich keineswegs nur von Großtieren ernährt haben, sondern auch von Meeresfrüchten und wilden Kartoffeln.

Inzwischen gibt es weitere Funde dieser Art. In den Five-Mile-Point-Höhlen bei Paisley in Oregon legte eine Forschergruppe 14 400 Jahre alte menschliche Fäkalien frei, die mit Samen von Wüstenpetersilie und anderen Pflanzenresten durchsetzt waren – nicht gerade die Art von Nahrungsmitteln, die zum Großwildjäger-Szenario passen würde. Dennis Jenkins, Leiter der Grabungen und Archäologe am Museum of Natural and Cultural in Eugene (Oregon), versichert: »Das spricht für eine breit gefächerte Sammelwirtschaft dieser Kultur.« Wobei der Anthropologe David Meltzer von der Southern Methodist University in Dallas (Texas) ohnehin schon am Klischee der Clovis als reinen Mammutjägern zweifelt: »Für kleine Gruppen von etwa 15 bis 20 Personen, eine für Nomadenvölker typische Größe, wäre das viel zu riskant gewesen. Kleinwild, Nüsse und Beeren, vielleicht auch Fisch und Schildkröten gehörten sicher auch auf den Speiseplan.«

Seit 2006 haben Waters und sein Team am Ufer des Buttermilk Creek eine der bislang wichtigsten Fundstätten untersucht. Unter einer Siedlungsschicht der Clovis-Kultur und damit eindeutig älter als diese entdeckten sie mehr als 19 000 Artefakte, von kleinen Klingen mit winzigen, durch die Bearbeitung von Knochen entstandenen Abnutzungsspuren bis hin zu einem glänzenden Stück Hämatit. Dieses Eisenmineral wurde in der Altsteinzeit gemeinhin zur Herstellung von rotem Farbstoff verwendet. An jenem Fundort, der im Frühjahr 2011 der Öffentlichkeit präsentiert wurde, kamen mehr Präclovis-Werkzeuge ans Licht als an allen anderen zusammen. Waters hat keine Kosten gescheut, um die Stätte mehrmals datieren zu lassen.

Die Schicht, in der die Artefakte steckten, wurde mittels optisch stimulierter Lumineszenz (OSL) untersucht. Dabei macht man sich eine Eigenschaft von Quarzkristallen zu Nutze, die beispielsweise in Sand vorkommen: Natürliche Radioaktivität regt darin Elektronen an, ihre Bindungsplätze zu verlassen und solche höherer Energie einzunehmen. Sind diese Kristalle dem Licht ausgesetzt, stimuliert das ein Zurückfallen in den ursprünglichen Zustand. Solange aber etwa Erde sie bedeckt, bewahren sie den angeregten Zustand. Erst im Labor frei gelegt und durch einen Lichtpuls aktiviert, geben die Kristalle die über die Jahrhunderte eingefangene Energie in Form eines kalten Leuchtens, der so genannten Lumineszenz, wieder ab. Aus dessen Intensität lässt sich auf die Zeit der Bedeckung schließen. Demnach ließen sich vor mehr als 15 500 Jahren Paläoindianer am Buttermilk Creek nieder. »Das ist mit Abstand der beste Beweis, dass es in Nordamerika schon vor den Clovis Menschen gab«, freut sich Vance Holliday, Anthropologe und Geowissenschaftler an der University of Arizona.

Eine Meisterleistung der Menschheit

Angespornt von solchen Funden entwickeln Archäologen neue Szenarien für die Besiedlung der Neuen Welt. Sie greifen dabei auf die Befunde einer ganzen Reihe von Naturwissenschaften zurück – von der Genetik bis hin zur Geologie – und suchen nach Antworten auf drängende Fragen: Woher kamen jene Neusiedler? Wann genau war das? Welchen Weg haben sie genommen? James Adovasio, ein Archäologe am Mercyhurst College in Erie (Pennsylvania), gehört zu den Epigonen des neuen Paradigmas. »Wir untersuchen nicht weniger als die Ausbreitung von Menschen in den letzten großen Lebensraum des Planeten nach der Besiedlung Australiens.«

Der lange Weg vom stürmischen Norden der Arktis über die heißen Regenwälder am Amazonas bis zu den kargen Regionen Feuerlands gehört zweifellos zu den Meisterleistungen der Menschheit. Es bedurfte über Generationen Durchhaltevermögen und Anpassungsfähigkeit. Nach Ansicht des berühmten französischen Archäologen François Bordes wird dem so lange nichts gleichkommen, »bis der Mensch auf dem Planeten eines anderen Sterns landet«. Leider gestaltet sich die Suche nach den Lagerplätzen jener Jäger und Sammler in den Weiten Nordamerikas und Asiens äußerst schwierig. Immerhin erfahren die Archäologen Unterstützung durch die Zunft der Genetiker. Diese haben in der Erbsubstanz (DNA) indigener Völker Hinweise darauf gefunden, wo und wann ihre Vorfahren einst aufbrachen.

In mehr als einem Dutzend Studien analysierten Molekularbiologen DNA-Proben der heutigen indigenen Bevölkerung sowie solche aus archäologischen Funden auf der Suche nach charakteristischen genetischen Mutationen. Von besonderem Interesse sind Varianten der Nukleotidsequenzen auf ein und derselben Stelle eines Chromosoms, so genannte Haplotypen, weil sich diese zur Definition von Hauptabstammungslinien eignen. Die Forscher identifizierten insgesamt sechs solcher Merkmale, welche die Vorfahren der heutigen Indianer auf den amerikanischen Kontinent gebracht haben. In der Alten Welt fand sich solch ein genetisches Profil

AUF EINEN BLICK

DIE VORFAHREN DER VORFAHREN

1 Archäologen hielten lange Zeit die etwa 13 000 Jahre alte so genannte **Clovis-Kultur** für die erste in Amerika. Neue Funde beweisen jedoch, dass Siedler den Kontinent bereits tausende Jahre zuvor betraten.

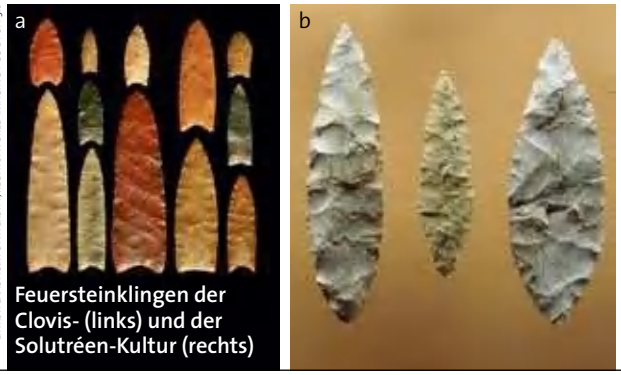
2 Laut genetischen Studien stammten die **Präclovis-Menschen** aus **Ostasien**, hielten sich aber längere Zeit auf **Beringia** auf, der Landbrücke zwischen den Kontinenten.

3 Vieles deutet darauf hin, dass einige der Neuankömmlinge auf dem **Landweg** gen Süden vorstießen, während andere in **Kanus** entlang der Küste fuhren.

Kam der erste Amerikaner aus Europa?

Auf dem Höhepunkt der letzten Eiszeit erstreckte sich eine Landschaft aus Eis und Meer quer über den Atlantik. Wäre es da nicht denkbar, dass Jäger der Solutréen-Kultur, die zwischen 22 000 und 18 000 v. Chr. im heutigen Frankreich und Spanien gedieh, in Kajaks am Rand der Gletscher immer weiter gen Westen vorstießen? Trinkwasser hätten sie aus dem Eis schmelzen können, Fisch und Meeressäuger gab es genug zu jagen; deren Fett hätte auch als Brennmaterial getaugt.

Diese These brachten die Archäologen Dennis J. Stanford von der Smithsonian Institution und Bruce A. Bradley von der University of Exeter (England) 1998 in die Diskussion ein. Anlass waren Ähnlichkeiten zwischen den Speerspitzen der Clovis (a) und Waffen der Solutréen-Jäger (b). Beispielsweise waren beide dünne, beidseitig nachbearbeitete Abschläge von Feuersteinknollen. In einer vermutlich 16 000 Jahre alten Schicht der wohl ältesten Fundstätte Nordamerikas, Cactus Hill in Virginia, kamen Spitzen zum Vorschein, die Stanford als technologisches Bindeglied zwischen Solutréen- und Clovis-Kultur deutet. Da die Menschen der ersteren bereits dünne Knochennadeln kannten, um Kleidung und Zelte zusammenzunähen, halten es die beiden Forscher für möglich, dass sie auch Kajaks herzustellen wussten.



Feuersteinklingen der Clovis- (links) und der Solutréen-Kultur (rechts)

LINKS: TEXAS A&M UNIVERSITY; RECHTS: WORLD IMAGING / CC-BY-SA-3.0

Zurzeit ist diese These aber eher eine Außenseitermeinung. So zweifeln viele Forscher daran, dass den Solutréen-Menschen solche Seereisen möglich waren, zumal es keinerlei Hinweise auf Boote gibt. Und dass sie die Kulturleistung der Höhlenmalerei nicht mit in die Neue Welt gebracht hätten, wäre wenig wahrscheinlich. Zudem wiesen Genetiker 2011 darauf hin, dass die genetischen Daten eine Abstammung heutiger Indianer und Paläoindianer von Europäern eher ausschließen.

Die Redaktion

nur in Südsibirien, in einem vom Altai-Gebirge im Westen bis zum Fluss Amur im Osten reichenden Gebiet.

Damit bestätigten die Genetiker einerseits die »Out of East Asia«-These der Clovis-first-Protagonisten (und widerlegten die so genannte Solutréen-Hypothese, Kasten oben). Anhand der Mutationsraten menschlicher DNA berechneten sie aber, dass die Vorfahren der Ureinwohner Amerikas schon vor 25 000 bis 15 000 Jahren auswanderten, weil von da an keine Vermischung mehr stattfand und sich genetische Veränderungen ausprägen konnten. Das wäre deutlich vor der Clovis-Kultur gewesen – und gibt ein neues Rätsel auf. Denn damals blockierten riesige Gletscher die Täler Nordasiens auf der einen Seite der Beringstraße und die Flächen im Norden Amerikas auf der anderen. Tatsächlich zeigen Klimarekonstruktionen, basierend auf Messdaten von Eiskernen aus Grönland und auf Messungen vergangener Meeresspiegelschwankungen, dass diese Eisschilde vor 19 000 bis 22 000 Jahren ihre größte Ausdehnung erreichten. Der Anthropologe Meltzer ist sicher: »Diese Menschen verstanden es hervorragend, sich an solche Bedingungen anzupassen. Sie verfügten über ein ganzes Arsenal an Taktiken und Strategien, um mit den Widrigkeiten zurechtzukommen.«

Experten für das Überleben

Dazu gehörte warme, maßgeschneiderte Kleidung aus Fellen, die mit Knochennadeln und Sehnen zusammengenäht wurden. Gewappnet mit einem über Generationen erworbenen Expertenwissen, betraten die Vorfahren der Paläoamerikaner eine arktische Welt, in der mächtige Eisschilde derart viel Wasser banden, dass der Meeresspiegel um mehr als 100 Meter sank. Damit lag der Kontinentalschelf von Nordostasien und Alaska trocken. Zusammen mit den angrenzenden Gebieten in Sibirien, Alaska und dem Norden Kanadas war eine Verbindung zwischen den Kontinenten entstanden – Beringia.

Hatten die präcloviszeitlichen Migranten sie erst einmal erreicht, ließ es sich dort vermutlich nicht allzu schlecht leben. Die Luft, die über das Land hinwegzog, war so trocken, dass kaum Schnee fiel und sich somit auch keine Eisdecke bilden konnte. Als Folge davon gediehen hier Gräser, Seggen und andere der Kälte angepasste Pflanzen. Das beweisen zum Beispiel Überreste, die im Nordwesten Alaskas unter einer Schicht Vulkanasche zu Tage kamen. Auch in gefrorenen Eingeweiden wurden sie gefunden. Diese stammten von großen Pflanzenfressern, die offenbar einst in einer Tundrenlandschaft weideten. Auf Beringia grasten Wollmammuts von bis zu neun Tonnen Lebendgewicht, große Bodenfaultiere, Steppenbisons, Moschusochsen und Rentiere. Genetische Studien heutiger Populationen Stellerscher Seelöwen deuten darauf hin, dass diese Meeressäuger wahrscheinlich auf den vielen Inseln entlang der beringischen Südküste Station machten. Es gab also ausreichend Beutetiere.

Zu den Theorien in Sachen Besiedlung der Neuen Welt gehört auch, dass es die Neuankömmlinge ziemlich eilig hatten, in südlichere Gefilde zu kommen. Die genetischen Hauptabstammungslinien heutiger amerikanischer »natives« weisen aber nicht nur Haplotypen auf, die sie mit sibirischen Gruppen teilen, sondern es fehlen ihnen auch bestimmte. Weil

Die Reise durch das Eis

Großwildjäger aus Asien – die so genannte Clovis-Kultur – folgten den Herden ihrer Beutetiere über die heute versunkene Landbrücke Beringia und erreichten Nordamerika vor etwa 13 000 Jahren. Das besagt die herkömmliche Auffassung der Wissenschaftler. Jüngste geologische und archäologische Forschungen zeigen aber, dass Menschen die Neue Welt bereits betraten, lange bevor die Clovis ihre charakteristischen Steinwerkzeuge hinterließen. Es werden zwei mögliche Routen in Betracht gezogen: eine entlang der Küste sowie ein eisfreier Korridor im Landesinneren.

Landroute: Der eisfreie Korridor

Der Clovis-Hypothese zufolge trennte sich das Kordilleneneis erst vor 13 000 Jahren vom Laurentidischen Eisschild. Davor wäre eine Migration übers Festland unmöglich gewesen. Neuen geologischen Befunden zufolge öffnete sich der Korridor jedoch bereits vor 15 000 Jahren.

tatsächliche Größe

Schlüsselfunde: Santa-Rosa-Insel

Charakteristische Steinspitzen in Form eines Weihnachtsbaums von der Santa-Rosa-Insel sind 11 800 Jahr alt. Sie ähneln 15 000 Jahre alten Steinwerkzeugen aus Ostasien und deuten damit auf eine frühe Migrationsroute hin.

tatsächliche Größe

Fundstätten der Clovis-Kultur, New Mexico

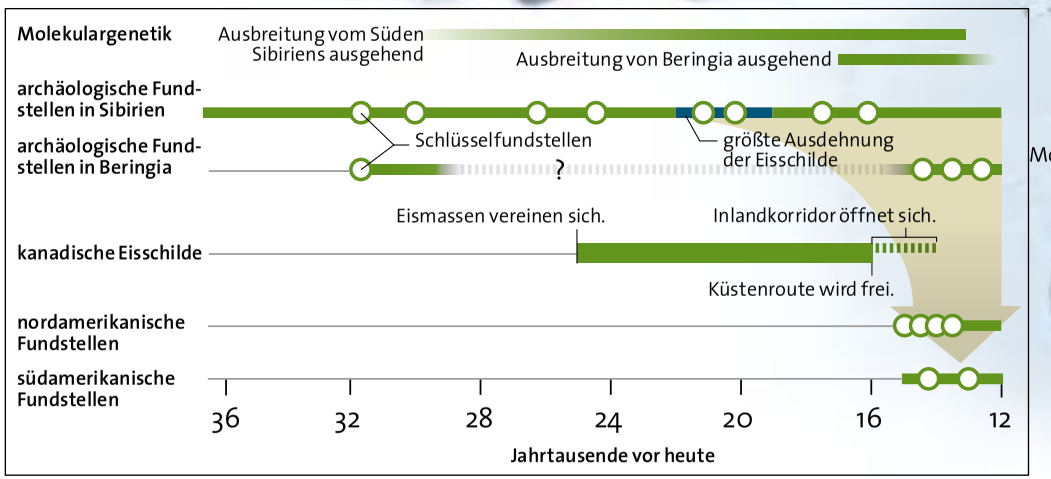
In den 1930er Jahren wurden nahe Clovis, New Mexico, an der Fundstelle Blackwater Nr. 1 lange, gestielte Speerspitzen entdeckt. Sie waren zur Jagd auf Großwild wie Wollmammuts geeignet. Diese Waffen bildeten die Basis für die Hypothese, nach der die Clovis-Kultur als erste den amerikanischen Kontinent besiedelte.

Küstenroute

Von Ostasien aus könnten bereits vor 16 000 Jahren kleine Boote in den Süden Beringias vorgestoßen und dann entlang der Westküste des amerikanischen Kontinents gefahren sein.
Die Küste von British Columbia war zu dieser Zeit eisfrei und bot reichlich Nahrung. Die älteste bekannte Fundstelle an der Küste ist 14 600 Jahre alt, noch ältere könnten heute unter dem Meeresspiegel liegen.

Schlüsselfunde: Friedkin, Texas

Tausende von Artefakten kamen bei Grabungen am Buttermilk Creek (Texas) zum Vorschein. Ihr Alter von 15 500 Jahren widerlegt die »Clovis-first«-Theorie. Ähnlichkeiten in der Machart könnten ein Indiz dafür sein, dass die Menschen vom Buttermilk Creek die Vorfahren der Clovis waren.



Ketten von Indizien

Betrachtet man genetische, archäologische und geologische Daten im Zusammenhang, dürften Menschen von Sibirien kommend vor etwa 15 000 bis 25 000 Jahren über Beringia in die Neue Welt gekommen sein. Damals war die Pazifikküste bereits teilweise eisfrei, und auch im Landesinnern hatte sich ein Korridor geöffnet. Vor 14 600 Jahren hatten die Siedler Südamerika erreicht.

ILLUSTRATIONEN: TYLER JACOBSON; KARTE: KNR PRODUCTIONS; BERATER: KENNEDY MUNYIKWA, ATHABASCA UNIVERSITY, UND MICHAEL K. WATERS, TEXAS A&M UNIVERSITY (BESCHRIFTUNG); QUENTIN MACKIE, UNIVERSITY OF VICTORIA (KÜSTENROUTE); STUART J. FIEDEL, LOUIS BERGER GROUP, UND BEN POTTER, UNIVERSITY OF ALASKA FAIRBANKS (LANDROUTE);
FOTO SANTA ROSA FUND: MIT FRDL. GEN. VON JON M. ERLANDSON, UNIVERSITY OF OREGON, MUSEUM OF NATURAL AND CULTURAL HISTORY; FOTOS CLOVIS UND FRIEDKIN FUND: MIT FRDL. GEN. VON MICHAEL R. WATERS, TEXAS A&M UNIVERSITY, CENTER FOR THE STUDY OF THE FIRST AMERICANS;
ZEITLEISTE NACH GOEBEL T. ET AL.: THE LATE PLEISTOCENE DISPERSAL OF MODERN HUMANS IN THE AMERICAS. IN: SCIENCE 319, S. 1497–1502, 2008 (GLACIALES MAXIMUM UND KORRIDORÖFFNUNG NACH NEUEREN QUELLEN)

diese Gensequenzen gleichzeitig unter der indigenen Bevölkerung weit verbreitet sind, dürften die Migranten und ihre Nachkommen noch Jahrtausende im Norden Ostasiens oder auf Beringia verbracht und sich dort weiterentwickelt haben, bevor sie schließlich den amerikanischen Kontinent betraten. Es ist vorstellbar, dass sie während dieser Zeit von ihren asiatischen Verwandten abgeschnitten wurden, weil das Klima vor etwa 22 000 Jahren kälter wurde und die Bewohner Sibiriens dazu zwang, gen Süden auszuweichen.

Vor gut 19 000 Jahren wurde es langsam wieder wärmer, und die Eisdecken Nordamerikas schmolzen nach und nach ab. Allmählich bildeten sich zwei eisfreie Korridore in Richtung Süden. Das passt genau zu den Resultaten genetischer Studien, denen zufolge die frühesten Migranten zwischen 18 000 und 15 000 Jahren vor heute eintrafen.

Auf den Spuren der Seefahrer

Der Paradigmenwechsel »die Clovis-Menschen waren nicht die ersten Amerikaner« zieht einen anderen nach sich. Denn zwischen Alaska und der auf 14 600 vor heute datierten Fundstelle Monte Verde liegen gut 20 000 Kilometer – weshalb Archäologen wie Jon M. Erlandson von der University of Oregon in Eugene auch ernsthaft daran zweifeln, dass die Besiedlung ausschließlich zu Fuß erfolgte. Erlandson, der vor allem an prähistorischen Fundorten entlang der Küste Kaliforniens gräbt, gehört zu den führenden Vertretern der Küstenroutentheorie, der zufolge die ersten Neuankömmlinge über das Meer kamen. Es war ihnen wohl möglich, kleine Boote von Ostasien in den Süden Beringias und entlang der Westküste des amerikanischen Kontinents zu steuern.

Ein Vordenker dieser These ist der Archäologe Knut Fladmark, jetzt emeritierter Professor der Simon Fraser University in British Columbia. Er hatte in den 1970er Jahren geologische und archäobotanische Daten zusammengetragen, um die Umweltbedingungen entlang von Kanadas Westküste am Ende der letzten Kaltzeit zu rekonstruieren. Bis dahin glaubten die meisten Experten, die gesamte Nordwestküste müsse unter einer dicken Eisschicht gelegen haben. Doch anhand von Pollenanalysen bewies Fladmark, dass auf der

Olympic-Halbinsel im Nordwesten des Bundesstaats Washington vor 13 000 Jahren ein Nadelwald wuchs und dass sich derartige grüne Refugien die Küste entlangzogen. Dort hätte es auch genug Nahrung gegeben: Meeresfrüchte, Schalentiere und Lachse, Wasservögel und Rentiere.

Inzwischen wissen Archäologen: Ein Großteil der Küste des heute kanadischen British Columbia war schon vor mindestens 16 000 Jahren eisfrei. Auch wenn bis jetzt noch keine Reste von Booten gefunden wurden, denken viele Forscher, dass diese Technologie damals bekannt war. Schließlich hatten Menschen vor mindestens 45 000 Jahren den Weg von Asien nach Australien zurückgelegt, indem sie von Insel zu Insel fuhren. Die Route entlang der Westküste der Neuen Welt wäre weit einfacher als das gewesen – auch einfacher als eine Besiedlung Amerikas auf dem Landweg. »Die Umgebung und damit die Lebensbedingungen blieben relativ gleich, was diese Strecke zum Weg des geringsten Widerstands machte«, glaubt Quentin Mackie, Archäologe an der University of Victoria in British Columbia.

Zwar gelang es noch nicht, Lagerplätze dieser Seefahrer zu entdecken, denn als die Eismassen tauten, stieg der Meeresspiegel, und die alten Küstenlinien liegen heute mehrere Meter tief unter Wasser. Im März 2011 legten Erlandson und sein Kollege Todd J. Braje von der kalifornischen San Diego State University jedoch einen indirekten Beweis der Küstenroutentheorie vor. Auf der Insel Santa Rosa, gut zehn Kilometer vom Festland entfernt, entdeckten sie eine Fundstelle nahe der Mündung einer Felsschlucht und möglicherweise auch eines Sumpfgebiets. Die Grabungen brachten allerlei Abfälle zum Vorschein, darunter Tierknochen und Holzkohle, die mit Hilfe der Radiokohlenstoffmethode in die Zeit vor 11 800 Jahren datiert wurden. Offenbar hatten Jäger auf der Insel Süß- und Salzwasservögeln wie Kanadagänsen und Kormoranen nachgestellt, außerdem Flossenfüßern wie Robben und Seelöwen. Die Jäger hinterließen auch Zeugnisse ihrer Werkzeugtechnologie: mehr als 50 zierliche, gestielte Steinspitzen, deren Form ein wenig an Weihnachtsbäume erinnert und die vermutlich einst an Wurfpfeilen befestigt waren. »Sie sind wirklich sehr dünn und extrem sorgfältig gearbeitet«, sagt Erlandson.

Obwohl diese Waffen aus der Zeit der Clovis stammten, ähneln sie deren stämmigen Speerspitzen also überhaupt nicht. Erlandson und Braje stöberten deshalb in archäologischen Berichten über andere Ausgrabungen und wurden entlang des nördlichen Pazifikrands fündig. Die ältesten vergleichbaren Objekte waren auf der koreanischen Halbinsel, in Japan und Ostrussland entdeckt worden – und alle datierten auf etwa 15 000 Jahre vor heute. Die Übersicht ergab zudem, dass die Fundplätze umso jünger wurden, je weiter man sich von Ostasien entfernte. Es gibt 14 000 Jahre alte gestielte Spitzen aus Oregon und 12 000 Jahre alte auf den kalifornischen Kanalinseln, auf der Baja California und an der Küste Südamerikas.

Die beiden Forscher glauben jetzt, dass diese Waffentechnologie eine Route markiert, sozusagen einen Fernverkehrs-

MIT FRDL. GEN. VON MICHAEL R. WATERS, TEXAS A&M UNIVERSITY

Nahe dem Buttermilk Creek in Texas entdeckten Archäologen Artefakte, die eindeutig älter sind als die Clovis-Kultur. Jäger könnten hierhergekommen sein, um den dort vorhandenen Feuerstein abzubauen und daraus Werkzeuge herzustellen.

weg entlang der Küste, der ein reiches Nahrungsangebot bereithielt. So gedeihen in den kalten, nährstoffreichen Gewässern dort heute Kelpwälder, die zahlreiche Tierarten beherbergen, von Barschen bis hin zu Seeottern. Marine Algenwälder dieser Art wuchsen auch während der letzten Kaltzeit in jener Region, wahrscheinlich sogar entlang der Südküste Beringias. Untersuchungen zur Ozeantemperatur vor 18 000 Jahren deuten darauf hin, dass sie nur während der Wintermonate vereist waren. Kelp kann aber unter Meereis mehrere Monate überleben, um dann nach Anbruch des Sommers schnell zu wachsen. »Und es ist nicht nur der Kelpwald, der eine Wanderung entlang der Küste ermöglicht hätte«, meint Erlandson. »Es gab reichlich Nahrung in den Mündungsgebieten, und in den Flüssen schwammen Lachse.«

Auch wenn sie in Kanus wesentlich schneller vorankamen als andere Paläoamerikaner auf dem Landweg, dürften sich die Siedler nur etwa einen Kilometer pro Jahr gen Süden bewegt haben, während sie ihr Territorium nach und nach ausdehnten. Sonst hätte die Gefahr bestanden, dass die Verbindung zu anderen Gruppen abriss – und im unbevölkerten Landstrich keine Sexualpartner mehr zur Verfügung standen.

Obwohl die über Land verlaufenden Routen durch solche Erkenntnisse ein wenig an Attraktivität verloren haben, sind sie doch noch nicht vollständig aus dem Rennen. In den letzten fünf Jahren hat ein Team von Geowissenschaftlern und Datierungsexperten unter der Leitung von Kennedy Munyikwa, einem Geologen an der Athabasca University in Alberta, den eisfreien Korridor in Augenschein genommen: Als sich Nordamerikas größter Eisschild, der Laurentidische, gen Osten zurückzog, entstand zwischen ihm und dem Kordilleren-Eisschild im Westen eine Passage – nachdem die verbliebenen riesigen Gletscherseen ausgetrocknet waren. Der Korridor verlief entlang der Ostseite der Rocky Mountains und erstreckte sich über fast 1900 Kilometer von Alaska bis in die heutigen Südstaaten der USA.

Das neuerliche Interesse daran weckten Datierungen, die Munyikwa und seine Kollegen im Juni 2011 in der Zeitschrift »Quaternary Geochronology« veröffentlichten. Bereits in den 1980er Jahren hatten Forscher des Geological Survey of Canada die Öffnung des Korridors anhand von Pflanzenresten aus alten Sedimenten auf etwa 13 000 Jahre vor heute datiert. Als Munyikwa diese Untersuchungen im Zuge eines Projekts über steinzeitliche Umweltveränderungen genauer betrachtete, hielt er sie aber für problematisch. Denn es gab nur wenige Radiokohlenstoffdatierungen, und einige davon waren nicht verlässlich. Des Weiteren zeigten die datierten Pflanzen offenkundig nicht den Zeitpunkt an, zu dem sich das Eis zurückgezogen hatte und die Seen trockengefallen waren, sondern eine Phase, in der sich bereits eine Vegetation im Korridor etabliert hatte. Daher entschieden die Forscher, die Öffnung der Passage mittels der erwähnten OSL-Methode erneut zu bestimmen. Sie konzentrierten sich dabei zunächst auf einen Abschnitt im Norden Albertas, in dem es große Sanddünen gibt – einige über zehn Meter hoch –, die nach dem Rückzug des Laurentidischen Eisschilds aus vom Wind verwehten Sedimenten entstanden.

Um die nötigen Proben zu nehmen, gruben die Forscher Schächte in die größten Dünen und trieben dann schwarze Plastikrohre horizontal in deren Seitenwände. Auf diese Weise verhinderten sie, dass der Sand, der die Behälter füllte, dem Sonnenlicht ausgesetzt wurde. Laut OSL-Methode hatten sich die Dünen vor 15 000 bis 14 000 Jahren gebildet, und zwar aus den Sedimenten eines bis dahin trockengefallenen Gletschersees. »Es ist gut möglich, dass das Eis noch einmal ein Jahrtausend früher abgeschmolzen ist.«

Die große Frage ist jetzt, ob der gesamte Korridor während dieser Zeitspanne eisfrei war, besonders im nördlichen Abschnitt, der den Zugang zur Neuen Welt bot. Munyikwa glaubt, dies sei der Fall gewesen. Sein Team hat vor Kurzem Sanddünen entlang der Grenze zwischen den Nordwestterritorien und Alberta datiert und ähnliche Resultate erzielt. Das bestätigt auch das aktuelle Bild der Geologen, »dass sich die Eisdecke nicht in Form mehrerer Gletscherzungen, sondern auf breiter Front zurückgezogen hat. Wir stellen es uns so vor, dass das freie Gelände in Richtung Norden immer größer wurde.« Trifft das zu, könnten Einwanderer aus Asien den Korridor zur Zeit der Dünenbildung betreten haben, also vor ungefähr 15 000 Jahren. Und zwar über einen 400 Kilometer breiten Zugang im Norden Albertas, wie Munyikwa herausfand.

Ein Korridor durch das Eis

Der Archäologe Jack Ives von der University of Alberta in Edmonton meint, die neuen OSL-Daten würden die Diskussion über die Wanderrouten anheizen. »Viele glauben, die Korridorregion sei gut erforscht, aber das stimmt nicht. Die Fläche ist riesig, und wir wissen wenig über sie.« Die ältesten allgemein anerkannten Beweise für Menschen im Korridor sind ungefähr 12 000 Jahre alt, aber Ives ist der Meinung, dass systematische Geländebegehungen auch noch ältere Fundstellen identifizieren könnten. Also Inland- statt Küstenroute? »Ich denke, wenn die Küste so etwas wie die Autobahn A 1 war, dann war der Inlandkorridor die A 2.«

Die von den Gletschern geformte, karge und von eisigen Winden durchzogene Landschaft dürfte den Neuankömmlingen einige Mühen bereitet haben. Dennoch ließen sie sich nicht abschrecken. Vielleicht hatten sie beobachtet, wie dort Schwärme von Seevögeln im Herbst gen Süden zogen und im Frühjahr wieder zurückkehrten. Stuart Fiedel vertritt diese Meinung. Er ist Archäologe des Ingenieurunternehmens The Louis Berger Group in East Orange (New Jersey). Zwar wäre das Nahrungsangebot knapper als an der Küste gewesen, doch die Pioniere könnten Vögel oder auch größere Tiere gejagt haben: Neueren genetischen Daten zufolge lebten in zwei Refugien im nördlichen Kanada, nämlich im Yukonterritorium und im Norden British Columbias, damals Bergschafe.

Vielleicht begleitete auch der beste Freund des Menschen die Siedler. Laut fossilen Funden hatten sibirische Jäger bereits vor 33 000 Jahren Wölfe domestiziert. Fiedel glaubt, dass Hunde bei der Jagd halfen, aber auch als Packtiere dienten. Die Indianer der nordamerikanischen Prärien hatten die Tiere vor der Ankunft der Pferde dafür eingesetzt. Auf so genannten Stangenschleifen (im Fachjargon Travois) kann ein Hund Lasten bis zu 27 Kilogramm befördern, wie Experimente in den 1990er Jahren zeigten. Mit nur 13 Kilogramm beladen, legt er bis zu 27 Kilometer pro Tag zurück, kühle Temperaturen vorausgesetzt. Und wenn Hunger drohte, bildeten die Tiere eine Notreserve.

Fiedel hat ausgerechnet, dass die Paläoamerikaner den Korridor bei einer moderaten Geschwindigkeit von 16 Kilometern pro Tag nach vier Monaten passiert haben könnten. Dann aber bot sich ihnen geradezu ein Paradies: grasbewachsene Ebenen mit Herden von Mammuts, Bisons und Pferden; Sumpfland und Seen reich an Wasservögeln; ein Ozean voller Fische und Meeressäuger. Es war ein Land ohne Konkurrenten, eine Welt voller Möglichkeiten.

In dem dunklen, klimatisierten Haus, das als Hauptquartier des Grabungslagers am Buttermilk Creek dient, hebt Waters den Deckel von einer schwarzen Kiste in der Größe eines Notebooks. In der Küche scherzen einige Teammitglieder, während sie das Essen vorbereiten, aber Waters nimmt das Gerede nicht wahr. Er lässt den Blick über den Inhalt der Kiste schweifen und entnimmt ihr einige präcloviszeitliche Artefakte. Hergestellt aus einem glänzenden Feuerstein, der nahe dem Fluss ansteht, erscheinen sie bemerkenswert leicht und klein, manche sind gerade einmal ein paar Zentimeter lang. Solch ein Werkzeugset wäre ideal für Menschen gewesen, die nie lange an einem Ort blieben, sondern in unbekanntes Gelände vordrangen und es erforschten.

In einigen dieser Klingen und Faustkeilen erkennt Waters sogar noch etwas anderes: einen Hinweis auf die Ursprünge der Clovis-Kultur. Etwa 2500 Jahre, nachdem diese Waffen und Werkzeuge am Buttermilk Creek aus Rohlingen geformt wurden, setzten Clovis-Jäger in ganz Nordamerika ähnliche Arbeitstechniken ein, um ihre massiven, länglichen Klingen herzustellen, von denen einige 21 Zentimeter Länge erreichten. Bei allen Unterschieden in der Form gab es womöglich eine technologische Kontinuität – laut Waters ein Indiz für eine Verbindung zwischen den beiden Kulturen. »Es sieht für mich danach aus, als hätten sich die Clovis dann südlich des Eisschilds entwickelt und nicht in Asien.«

DIE AUTORIN

Heather Pringle arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in Kanada. Sie ist ständige Autorin der amerikanischen Zeitschrift »Archaeology«.

QUELLEN

Erlandson, J. M. et al.: Paleoindian Seafaring, Maritime Technologies, and Coastal Foraging on California's Channel Islands. In: Science 331, S. 1181–1185, 2011

Munyikwa, K. et al.: Constraining the Late Wisconsian Retreat of the Laurentide Ice Sheet from Western Canada Using Luminescence Ages from Postglacial Aeolian Dunes. In: Quaternary Geochronology 6, S. 407–422, 2011

Waters, M. R. et al.: The Buttermilk Creek Complex and the Origins of Clovis at the Debra L. Friedkin Site, Texas. In: Science 331, S. 1599–1603, 2011

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1149650**

Damit aus Neugier Wissen wird.

Für alle Wissbegierigen zwischen 10 und 14 Jahren, die nicht nur das »Was«, sondern auch das »Wie« und »Warum« interessiert, gibt es jetzt ***Spektrum NEO***. In jeder Ausgabe wird ein großes Thema behandelt – in Heft Nr. 2: »Die Welt im Jahr 2050«.

In Zusammenarbeit mit dem Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik in Kiel

facebook

Bestellen Sie schon jetzt:

www.spektrum-neo.de

VIERDIMENSIONALE GEOMETRIE

Das ikosidodekaedrische Prismatohexakosihekatonikosachoron

In vier Dimensionen gibt es weitaus mehr archimedische Körper als in den gewöhnlichen drei. Obendrein sind die meisten von ihnen groß und prachtvoll.

VON CHRISTOPH PÖPPE

Für uns beschränkte dreidimensionale Wesen ist der vierdimensionale Raum neu, unbekannt und vielleicht auch ein bisschen beängstigend, auf jeden Fall sehr gewöhnungsbedürftig. Ich habe in früheren Folgen dieser Rubrik von einer Reise in jene Gegend berichtet, wo man einen ganzen Menschen um seine Kragenebene knicken kann, ohne dass es weh tut, und wo es sehr schwierig ist, jemanden einzusperren: Während bei uns eine Kiste mit vier Seitenwänden, Boden und Deckel genügt, müssen es dort gleich acht massive, sprich dreidimensionale Klötze sein (Spektrum der Wissenschaft 11/2004, S. 101, und 12/2004, S. 106).

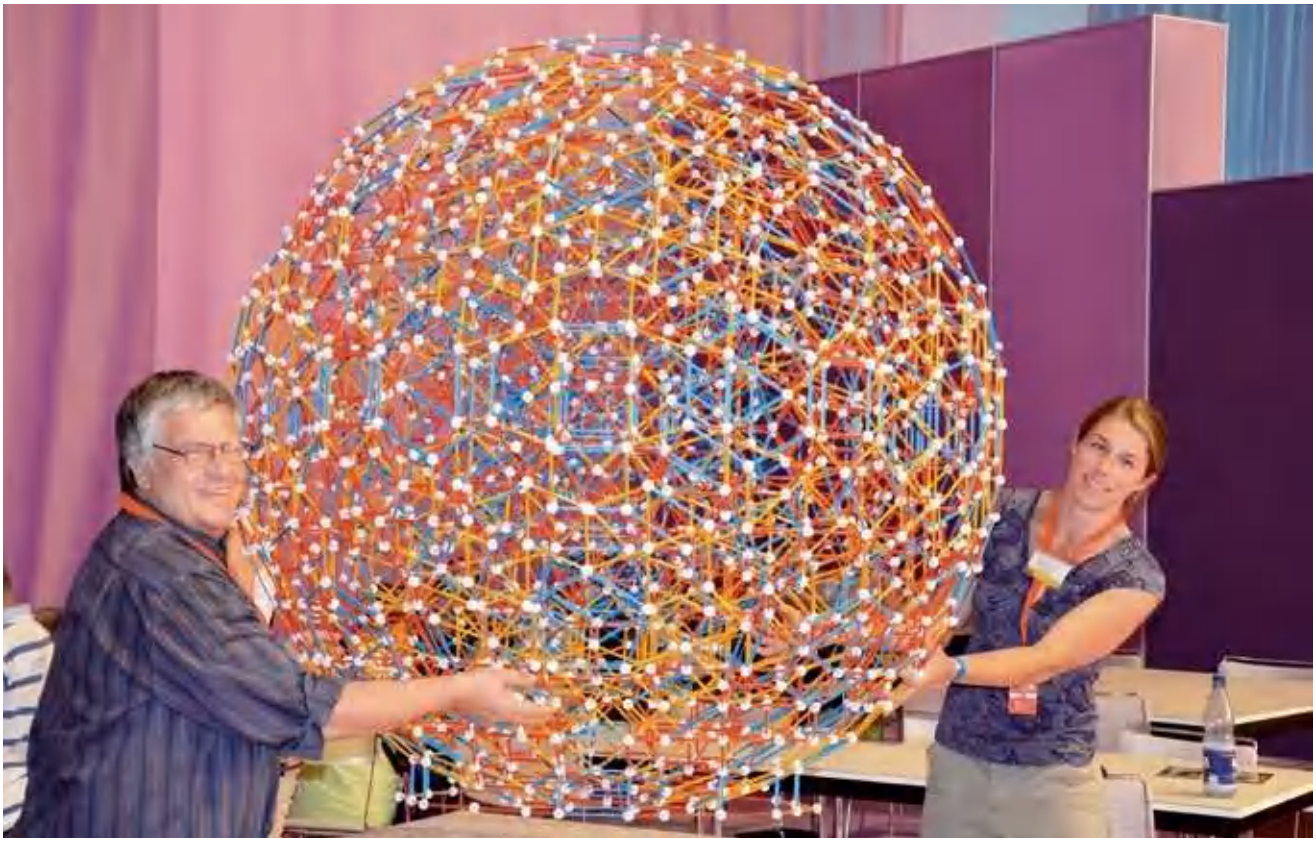
Aus der Perspektive der vierten Dimension sind diese Klötze allerdings beliebig dünn, ebenso wie die Seitenflächen, die einen gewöhnlichen Würfel begrenzen, dünne Quadrate sind. Ein vierdimensionaler Würfel hat nicht nur sechs, sondern acht »Grenzflächen« – nur sind es eben keine Flächen, sondern dreidimensionale Körper; man nennt sie »Zellen«. Allgemein besteht der Rand eines n-dimensionalen Körpers aus $(n-1)$-dimensionalen Körpern: Der vierdimensionale Würfel, in der Literatur häufig als »Tesserakt« bezeichnet, ist begrenzt von dreidimensionalen Würfeln und die wiederum von zweidimensionalen regelmäßigen Körpern – in diesem Fall Quadraten. Manchmal ist es nützlich, diese Vereinheitlichung noch weiter zu treiben, auch wenn die Bezeichnungen »eindimensionaler regelmäßiger Körper« für eine Strecke und »nulldimensionaler regelmäßiger Körper« für einen Punkt etwas albern und hochtrabend wirken.

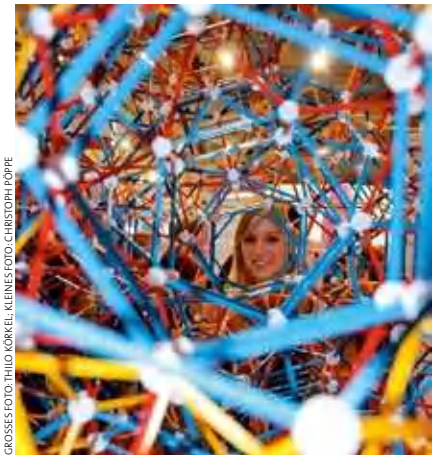
Zu den besonderen Sehenswürdigkeiten des vierdimensionalen Raums zählen die verallgemeinerten platonischen Körper. Die soeben eingeführte Bezeichnungsweise erlaubt es uns, alle platonischen Körper beliebiger Dimension in einem Aufwasch zu definieren, und zwar rekursiv: Man erklärt einen Begriff – hier »platonischer Körper« – in einer höheren Dimension durch den entsprechenden Begriff eine Dimension tiefer, diesen durch das Analogon noch eine Dimension tiefer, und so abwärts bis Dimension 1, und da ist alles ganz einfach. Ein eindimensionaler platonischer Körper ist schlicht eine Strecke. Ein n-dimensionaler platonischer Körper wird begrenzt von lauter gleichen $(n-1)$-dimensionalen platonischen Körpern, die überall in gleicher Weise aneinanderstoßen. Das ist schon die ganze Definition! Die Worte »in gleicher Weise« wären noch zu präzisieren; hier genügt es zu fordern, dass alle Winkel zwischen benachbarten Grenzlinien/-flächen/-körpern gleich sein müssen.

Diese Definition entfaltet ihre Wirkung, indem man sich von Dimension zu Dimension hocharbeitet. In zwei Dimensionen sind die platonischen Körper alle regelmäßigen (gleichseitigen und gleichwinkligen) Vielecke. In drei

Die Projektion des 120-Zells in den dreidimensionalen Raum. Die 120 Dodekaeder im Inneren des »Käfigs« (links; die beiden anderen Bilder zeigen das Ensemble aufgeklappt) erscheinen in neun Schichten: zuinnerst das »Baby«, klein, weiß und unverzerrt, darum der Reihe nach 12 blaue, 20 rote, 12 gelbe, 30 grüne, 12 gelbe, 20 rote und 12 blaue Dodekaeder, die immer größer und verzerrter werden (alle Dodekaeder einer Schicht sind kongruent). Der »Käfig« ist wieder unverzerrt.

CHRISTOPH PÖPPE





GROSSES FOTO: THILO KÖRKEL; KLEINES FOTO: CHRISTOPH PÖPPE

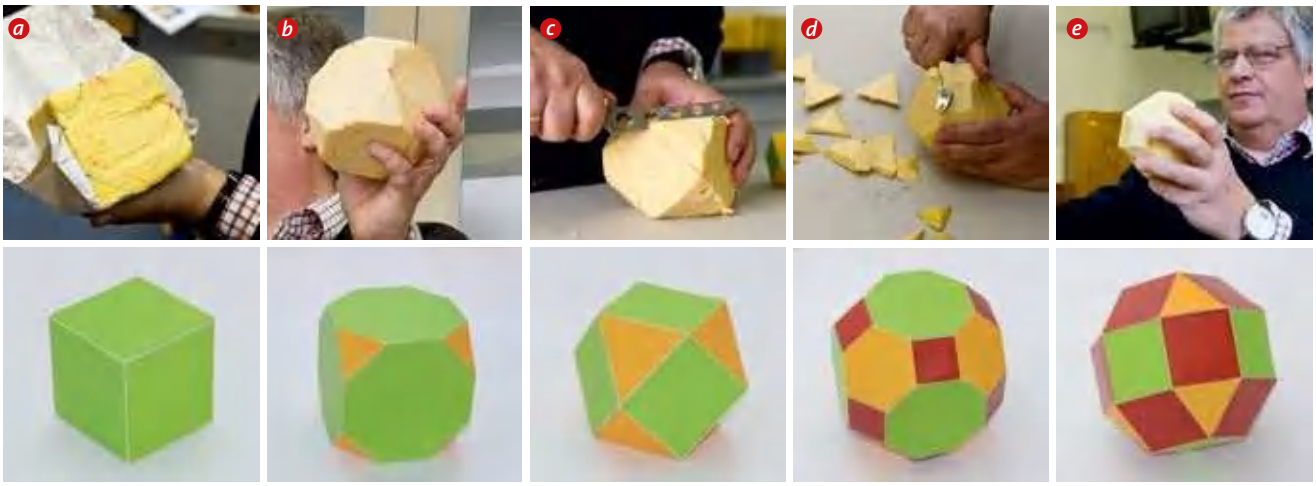
Das ikosidodekaedrische Prismatohexakosihekatonikosachoron, auch abgekantetes 600-Zell genannt, in der Projektion in den dreidimensionalen Raum. Eine Gruppe von 16 Elftklässlern hat den größten Teil dieses Objekts im September 2011 auf der »Ideen-Expo« in Hannover in anderthalb Stunden aus Zometool-Teilen zusammengesteckt; ein kleines Häuflein Unentwegter benötigte für die Endmontage noch weitere zwei Stunden. Das fertige Objekt besteht aus 1860 Kugeln und 5340 Stäben; es hat mehrere »Durchblickröhren«, die von lauter Fünfecksflächen freigehalten werden (kleines Bild).

Dieser geometrische Körper, jetzt zusammengesteckt von einer Schülergruppe des Heidelberger Hölderlin-Gymnasiums, wird auf der Mitmachausstellung »Explore Science« (www.explore-science.info) vom 20. bis zum 24. Juni im Mannheimer Luisenpark zur Schau gestellt.

Dimensionen sind es die fünf bekannten: Tetraeder, Oktaeder, Würfel, Ikosaeder und Dodekaeder, die in den »Mathematischen Unterhaltungen« vom März und Mai dieses Jahres eine prominente Rolle spielten.

In vier Dimensionen gibt es ihrer sechs: das Fünfzell aus fünf Tetraedern, den Tesserakt aus acht Würfeln, das 16-Zell aus 16 Tetraedern, das 24-Zell aus 24 Oktaedern, das 120-Zell aus 120 Dodekaedern und das 600-Zell aus 600 Tetraedern. Da die beiden letztgenannten über so viele Grenzzellen verfügen, sind sie selbst dann prachtvoll anzusehen, wenn man sie in der verlustbehafteten Projektion in den dreidimensionalen Raum betrachtet (Bild links; zur Projektion siehe den Kasten S. 63).

Noch mehr Vielfalt unter Beibehaltung der Schönheit – sprich Symmetrie – gewinnt man, indem man die Bedingungen etwas lockerer fasst. Das ergibt die archimedischen (halbregelmäßigen) Körper (Spektrum der Wissenschaft 5/2012, S. 66). Die Definition ist analog wie bei den platonischen Körpern: Alle gleichseitigen Vielecke sind per definitionem archimedische Körper in zwei Dimensionen; und ein n-dimensionaler archimedischer Körper wird von lauter $(n-1)$-dimensionalen archimedischen Körpern begrenzt, nur müssen die nicht mehr alle gleich sein. Es muss nur an jeder Ecke dasselbe Sortiment von Grenzzellen anliegen, und das stets in derselben Anordnung. (Genau genommen müsste man diese Bedingung noch etwas verschärfen, aber



OBERE REIHE: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / PHILIPP ROTHE; UNTERE REIHE: CHRISTOPH PÖPPE

Aus dem Würfel a entstehen nacheinander durch Abschneiden der Ecken der Würfelstumpf mit der Eckfigur (3, 8, 8) b (um jede Ecke liegen Flächen in der Reihenfolge Dreieck, Achteck, Achteck), durch radikales Abschneiden bis zum ehemaligen Kantenmittelpunkt das Kuboktaeder (3, 4, 3, 4) c, durch zusätzliches Abschneiden von Kanten das kleine Rhombenkuboktaeder (4, 6, 8) d und schließlich durch gleichzeitiges, noch radikaleres Abschneiden parallel zu allen bisherigen Schnittebenen das große Rhombenkuboktaeder (3, 4, 4, 4) e.

das soll uns hier nicht kümmern.) Für die dreidimensionalen Exemplare ist dieses Sortiment durch Aufzählung der Flächen, die einem Eckpunkt anliegen, in der richtigen Reihenfolge zu beschreiben. Diese »Eckfigur« (Beispiele in der Erläuterung zu den Bildern oben) kennzeichnet den archimedischen Körper eindeutig.

Schon in drei Dimensionen erweitert diese Lockerung die exklusive Gruppe der platonischen Körper um die unendlichen Serien der Prismen und Antiprismen sowie um 13 spezielle Körper. Diese sind es, die man im engeren Sinn als archimedisch bezeichnet.

In vier Dimensionen explodiert die Vielfalt. Neben zwei unendlichen Serien, die aus Verallgemeinerungen der Prismen und Antiprismen bestehen, finden sich stolze 41 Körper, welche die Bedingungen erfüllen. Einer von ihnen ist Thema dieses Artikels (Bild S. 61).

CHRISTOPH PÖPPE

Das Ikosidodekaeder (unten) entsteht, indem man einem Ikosaeder (links oben) oder auch einem Dodekaeder (rechts oben) die Ecken bis zur Mitte der Kanten abschneidet.

Die Erforscher solcher Körper stehen vor ähnlichen Schwierigkeiten wie die frühen Käfersammler im Regenwald: Die Objekte der wissenschaftlichen Begierde aufzusuchen und genau zu beschreiben, ist überaus mühsam (wenn auch im geometrischen Fall nicht wirklich lebensgefährlich); jeder Forscher sammelt vor sich hin und beschreibt die Fundstücke nach seiner eigenen Systematik; es ist sehr schwierig, festzustellen, ob zwei von verschiedenen Forschern gefundene Exemplare zur selben Art gehören oder nicht; es fehlen eine brauchbare Klassifikation und Namen, unter denen sich jeder etwas vorstellen kann.

Das hat den unangenehmen Nebeneffekt, dass man in der Literatur an Stelle treffender Namen für die geometrischen Objekte nur kryptische Kombinationen von Buchstaben und Zahlen findet oder – was nicht viel hilfreicher ist – endlos lange Namen voller griechischer Zahlwörter. Der Name im Titel dieses Artikels stammt von Norman Johnson, dem Klassifizierer der Johnson-Polyeder (Spektrum der Wissenschaft 3/2012, S. 61), und George Olshevsky, einem freischaffenden Autor, der sich mit vollständigen Sammlungen nicht nur vierdimensionaler Körper, sondern auch von Dinosauriergattungen und Marvel Comics hervorgetan hat. Das Bandwurmwort wäre als »ikosidodekaedrisches Prismen-600-120-Zell« zu übersetzen. »Ikosidodeka« heißt auch nur »zwanzig-zwölf«, bezieht sich hier aber auf das Ikosidodekaeder (Bild links), den (dreidimensionalen) archimedischen Körper (3, 5, 3, 5), der in 120-facher Ausfertigung in dem Prachtobjekt vorkommt.

Entecken und Entkanten

Leider macht einen dieser Name noch nicht wesentlich klüger, ebenso wenig wie die andere gängige Bezeichnung »cantellated 600-cell« (»abgekantetes 600-Zell«). Um dem Geheimnis der vierdimensionalen archimedischen Körper näher zu kommen, ist ein kurzer Blick auf ihre dreidimensionalen Kollegen hilfreich. Jeder von ihnen lässt sich nämlich gewinnen, indem man einen platonischen Körper auf symmetrische Weise beschneidet.

Das wiederum kann man auf zwei wesentlich verschiedene Weisen tun.

Einblick in den vierdimensionalen Raum – durch Projektion

Leider war noch nie ein Mensch in einem echten vierdimensionalen Raum. Und selbst wenn wir dort wären, könnten wir einen vierdimensionalen Gegenstand nicht wirklich und vollständig sehen. Wir sind nach wie vor in unserer Wahrnehmung auf den dreidimensionalen Raum, in dem wir leben, beschränkt – aber dieser Raum ist ein sehr dünner Teil des vollen vierdimensionalen Raums, ebenso wie eine Ebene nur einen verschwindend geringen Teil des dreidimensionalen Raums einnimmt.

Damit sind wir in derselben Situation wie irgendwelche Wesen, die nichts anderes kennen als die zweidimensionale Ebene, in der sie leben. Denken wir an Ameisen; das tut zwar den kognitiven Fähigkeiten dieser Tierchen Unrecht, aber wir können uns leicht vorstellen, dass deren ganze Wahrnehmungswelt aus der Oberfläche des Bretts besteht, auf das wir sie gesetzt haben. Dass für uns das Brett irgendwie im Raum orientiert ist und wir es nach Belieben kippen können, nehmen sie nicht wahr.

Wie können wir den Ameisen etwas von den geometrischen Verhältnissen in unserem Raum begreiflich machen? Eine Möglichkeit ist der Schattenwurf, allgemeiner gesagt die Projektion. Wir lassen ein Drahtmodell eines dreidimensionalen Gegenstands seinen Schatten auf die Ebene der Ameisenwelt werfen (Bild). Davon können die Ameisen sich den Gegenstand zwar immer noch nicht vorstellen, aber doch etwas über seine Geometrie herausfinden.

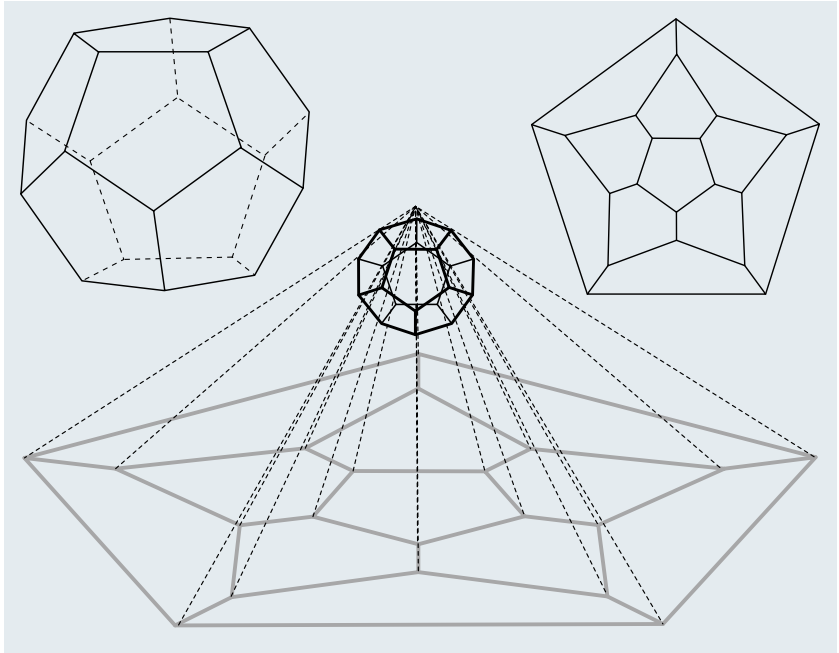
Oder die Ameisen fügen den zwei Koordinaten, mit denen sie ihre Ebene zu beschreiben pflegen, ganz formal und ohne Rücksicht auf ihr Vorstellungsvermögen eine dritte hinzu. Damit können sie immerhin rechnen.

So halten wir es mit der vierten Dimension auch: Wir erschließen uns mit vier statt drei räumlichen Koordinaten die Geometrie jener fiktiven Welt.

Es ist keine Hexerei, die Koordinaten der Eckpunkte eines vierdimensionalen Körpers zu berechnen. Man hänge in Gedanken eine punktförmige Lichtquelle knapp »oberhalb« des Körpers in Richtung der vierten Dimension und lasse sie in unseren dreidimensionalen Raum »herabscheinen«. Das heißt: Man berechne, wo die Gerade, die durch die Lichtquelle und einen Eckpunkt des Körpers definiert ist (der »Lichtstrahl«), unseren Raum trifft. Dort liegt der »Schatten« dieses Eckpunkts.

Allerdings ist dieser Schatten selbst ein dreidimensionales Gebilde. Wie bei der Projektion (»Schattenbildung«) üblich, werden Teile des Objekts verzerrt wiedergegeben, und zwar umso stärker, je streifender der Lichtstrahl diesen Teil trifft.

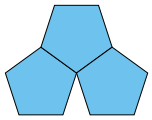
An Stelle einer punktförmigen Lichtquelle kann man auch parallele Lichtstrahlen verwenden, am besten solche, die senkrecht zu unserem dreidimensionalen Raum einfallen. In einer solchen »orthogonalen Projektion« ist in der Ameisenwelt zum Beispiel von einem Würfel nur ein Quadrat zu sehen, denn Boden- und Deckfläche werden auf dasselbe Quadrat abgebildet, und die Seitenflächen fallen zu Strichen zusammen. Allgemein liegen in der orthogonalen Projektion eines Körpers stets zwei Bilder übereinander: das von einer »oberen« Fläche, an welcher der Lichtstrahl in den Körper eintritt, und das einer »unteren«, an der er wieder austritt. Entsprechend ist der massive, dreidimensionale Schatten eines vierdimensionalen Körpers typischerweise »doppelt besetzt«.



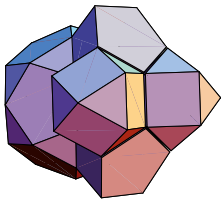
CHRISTOPH PÖPPE

So macht man einem zweidimensionalen Menschen oder einer »Ameise« ein Dodekaeder (links) begreiflich: Man hängt ein Drahtmodell über die Ebene und eine punktförmige Lichtquelle dicht über seine Deckfläche (Mitte). Der Schatten des Drahtmodells in der Ebene ist das Schlegel-Diagramm (rechts): Es besteht aus teilweise verzerrten Fünfecken; aber gewisse Eigenschaften, zum Beispiel dass sich in jeder Ecke drei Fünfecke treffen, bleiben erhalten.

Zusammenfalten in drei und vier Dimensionen



Um jede Ecke eines gewöhnlichen Dodekaeders liegen drei Fünfecke. Faltet man diese in den Raum auf, so verschwindet der keilförmige Zwischenraum zwischen zweien der Fünfecke.



CHRISTOPH PÖPPE

Beim abgekanteten 600-Zell liegen um jede Ecke ein Ikosidodekaeder (links im Hintergrund), zwei fünfseitige Prismen (oben und unten) und zwei Kuboktaeder (rechts und Mitte, Vordergrund). Alle fünf Teilkörper sind unverzerrt und im dreidimensionalen Raum dargestellt. Faltet man diese in den vierdimensionalen Raum auf, so verschwinden die sehr schmalen keilförmigen Zwischenräume zwischen einigen der Körper. Beim Auffalten werden benachbarte Körper um die gemeinsame Grenzfläche gegeneinander gedreht; im vierdimensionalen Raum finden Drehungen nicht um Achsen, sondern um ganze Ebenen statt.

MARCO MÖLLER

Entweder schneidet man dem Körper alle Ecken ab. Je nachdem, wie viel Kante man dabei mit wegschneidet, entsteht zum Beispiel aus dem Würfel der Würfelstumpf oder das Kuboktaeder (Bild S. 62 oben). Die neu entstehenden Flächen sind Dreiecke, weil jede der drei Flächen, die sich in jeder Ecke des Würfels treffen, eine Kante zu der Schnittfläche beiträgt. Damit die Symmetrie gewahrt wird, muss die Schnittebene senkrecht auf der Geraden stehen, die durch den Körpermittelpunkt und die jeweilige Ecke geht.

Oder man tut dasselbe wie der Schreiner, der ein Möbelstück etwas gefälliger und stoßsicherer gestalten will, und »kantet den Körper ab«. Das heißt, man schneidet entlang sämtlicher Kanten. Genauer ausgedrückt: Die Schnittebene steht senkrecht auf der Verbindungslinie von Körpermittelpunkt und jeweiligem Kantenmittelpunkt. Die entstehenden Schnittflächen bestehen aus einem rechteckigen Streifen mit angesetzten Dreiecken. Damit daraus Quadrate werden, muss man zusätzlich die Ecken noch etwas abschneiden.

Genau dieselben Techniken kann man auch auf die vierdimensionalen platonischen Körper anwenden. Nur findet die ganze Schneiderei eine Dimension höher statt. Das Messer schneidet nicht mehr in einer Ebene, sondern in einem ganzen dreidimensionalen Teilraum. Dieser Teilraum steht wieder senkrecht auf der Verbindungslinie zwischen Körpermittelpunkt einerseits und Eckpunkt, Kanten- oder Flächenmittelpunkt andererseits.

Hier wird es etwas mühsam fürs Vorstellungsvermögen. Dass ein Messer dreidimensional schneidet und eine Gerade auf einem ganzen Teilraum senkrecht steht – daran muss man sich in der vierdimensionalen Geometrie gewöhnen. Entsprechend ist das, was zu Tage tritt, nicht mehr eine Schnittfläche, sondern eine Schnittzelle: ein ganzer dreidimensionaler Körper, der seinerseits archimedisch sein muss, wenn das vierdimensionale Objekt diesen Namen verdienen soll.

Während in drei Dimensionen beim Kantenabschneiden Quadrate entstehen, sind es in vier Dimensionen typischerweise Prismen – fünfseitige beim abgekanteten 600-Zell, und zwar 720 Stück. Die 600 Tetraeder des ursprünglichen 600-Zells sind auf ebenso viele Kuboktaeder zusammengeschrumpft, und durch Eckenabschneiden kommen 120 Ikosidodekaeder zum Vorschein, also genau die Körper, die durch Eckenabschneiden aus dem Ikosaeder oder dem Dodekaeder hervorgehen (Bild S. 62 unten). An jeder Ecke des vierdimensionalen Körpers treffen sich ein Ikosidodekaeder, zwei fünfseitige Prismen und zwei Kuboktaeder (Kasten oben).

Dieselbe Verbundenheit, die zwischen Dodekaeder und Ikosaeder besteht und zum Beispiel in ihrem gemeinsamen »Kind«, dem Ikosidodekaeder, zum Ausdruck kommt, haben eine Dimension höher auch das 120-Zell und das 600-Zell. Man kann das abgekantete 600-Zell auch aus dem 120-Zell herleiten; das Verfahren ist allerdings gewöhnungsbedürftig.

Es bleibt erstaunlich, dass ein so einfach definiertes geometrisches Gebilde wie das abgekantete 600-Zell eine so große Zahl an Einzelelementen (Ecken, Kanten, Flächen und Zellen) enthält. Das Modell, welches das Bild auf S. 61 zeigt, legt davon Zeugnis ab – und ist sogar noch untertrieben: Von den 120 Ikosidodekaedern enthält es nur 75. 30 von ihnen sind durch die perspektivische Verzerrung bei der Projektion (Kasten S. 63) zu ebenen Gebilden geplättet. Von den restlichen 90 fallen je zwei durch die Projektion in eines zusammen, so dass die 45 mehr oder weniger verzerrten Ikosidodekaeder im Inneren des Modells doppelt zu zählen sind. ~

DER AUTOR

Christoph Pöppe ist promovierter Mathematiker und Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

QUELLE

Möller, M.: Vierdimensionale Archimedische Polytope. Dissertation, Universität Hamburg 2004. Online unter: **www.math.uni-hamburg.de/home/moeller/**

WEBLINKS

www.polytope.de
Website von Marco Möller zu vierdimensionalen Körpern allgemein

www.polytope.de/nr56.html
Mehr zur Hauptfigur dieses Artikels

www.spektrum.de/artikel/773614
Folge 8: Neue Körper entdecken – durch Entecken.
Zur Herstellung archimedischer Körper aus platonischen durch Entecken und Entkanten

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1149651

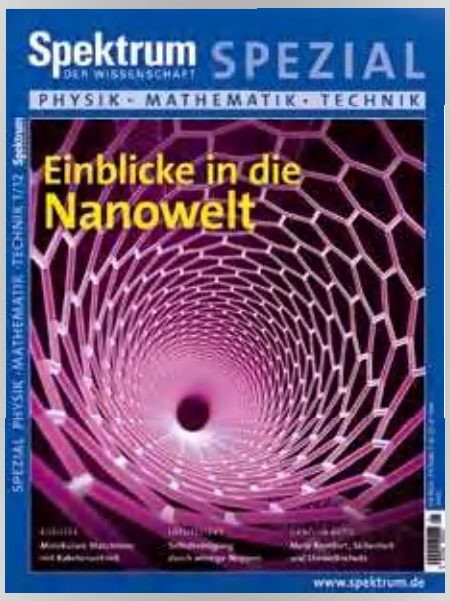
Thema Nanotechnologie bei Spektrum der Wissenschaft

Neu!

Als PDF direkt in Ihr Postfach

Lassen Sie sich schnell und kompakt über die wichtigsten Erkenntnisse im Bereich Nanotechnologie informieren! **Briefings Nanotechnology** erscheint monatlich digital und in englischer Sprache.

spektrum.com/briefings

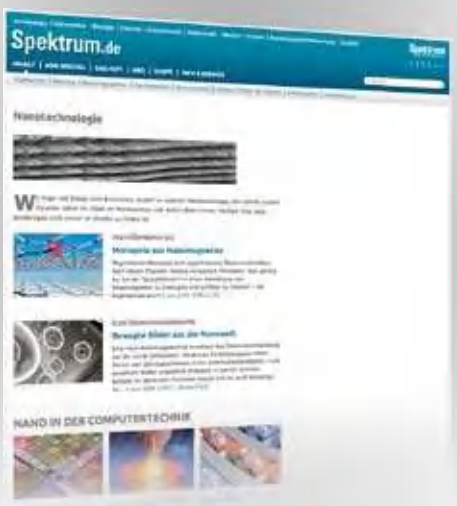


SPEKTRUM-SPEZIAL – PHYSIK • MATHEMATIK • TECHNIK 1/2012

»Einblicke in die Nanowelt«

Die Nanotechnologie ist unaufhaltsam auf dem Vormarsch und wird das 21. Jahrhundert prägen. Schon heute hat sie Eingang in unseren Alltag gefunden. Dieses **Spektrum-Spezial** bietet eine Sammlung wichtiger Artikel zum Thema Nanotechnologie aus **Spektrum der Wissenschaft**, die schlaglichtartig den aktuellen Stand und die Zukunft dieses Gebiets beleuchten – und wie es unser aller Leben beeinflussen wird.

spektrum.de/spezialabo



Themenseite »Nanotechnologie«

Hier finden Sie eine Zusammenstellung der wichtigsten Beiträge aus den Magazinen und Onlineberichten des Verlags rund um das Thema Nanotechnologie.

www.spektrum.de/nano

WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Sowjetische Forschung im Kalten Krieg

Während des Zweiten Weltkriegs mussten sich die Wissenschaftler der UdSSR völlig den militärischen Zwängen unterordnen. Doch auch danach galt militärische Stärke noch lange Zeit als oberstes Forschungsziel. Erst allmählich förderte die sowjetische Regierung auch zivile Projekte. Diesen gleitenden Übergang zeigt exemplarisch der Start des Sputnik-Satelliten am 4. Oktober 1957: eine Sensation, die die Welt veränderte.

Von Alexei B. Kojewnikow

Der Abwurf amerikanischer Atombomben auf Hiroschima und Nagasaki im August 1945 gilt Historikern wahlweise als letzter Akt des Zweiten Weltkriegs oder als Ouvertüre des Kalten Kriegs. In der Sowjetunion wurden die Bombenabwürfe allerdings nicht sogleich als Beginn eines feindlichen Verhältnisses zum ehemaligen Kriegsverbündeten verstanden, sondern lediglich als Herausforderung, technologisch gleichzuziehen. Nachdem Stalin den furchtbaren Krieg gewonnen hatte, wollte er auf keinen Fall den Frieden verlieren; er weigerte sich standhaft, wegen der unterschwelligen Bedrohung durch die Atombombe Zugeständnisse in den diplomatischen Nachkriegsverhandlungen zu machen. Unterdessen sollte schnellstmöglich die sowjetische Bombe entwickelt werden, um das Land in Zukunft gegen militärische Bedrohungen abzusichern und die Rolle der UdSSR als Supermacht symbolisch zu bekräftigen.

Schon am 20. August 1945, zwei Wochen nach der Bombardierung Hiroschimas, ließ das Staatliche Verteidigungskomitee ein Spezialkomitee für Uranenergie einrichten. Mit dieser Entscheidung rückte die Atombombe an die Spitze der staatlichen Prioritätenliste. Zuvor hatte sich die Uranforschung auf zwei kleinere Labore mit rund 100 Mitarbeitern – etwa ein Viertel davon Wissenschaftler – und einer winzigen Menge des radioaktiven Schwermetalls beschränkt. Doch das neue Uranforschungsprojekt stellte sogar große Industrieministerien in den Schatten und wurde von Lawrenti Beria geleitet. Als Kandidat des Politbüros war Beria an den wichtigsten politischen Entscheidungen beteiligt, als Mitglied des Staatlichen Verteidigungskomitees bestimmte er über wichtige Industriezweige, und als ehemaliger Vorsitzender des Volkskommissariats des Inneren (NKWD) koordinierte er weiterhin die Geheimdienste und konnte auf die Arbeitskraft tausender Gefangener zurückgreifen. Die Koordinierung all dieser Ressourcen war für den Erfolg des gigantischen militärisch-industriellen Projekts entscheidend, und Marschall Beria erwies sich in der Bewältigung seiner Aufgabe als rücksichtsloser, zynischer und höchst effektiver Koordinator.

Große Wissenschaftsprojekte waren in der Sowjetunion nicht Neues. Die Verflechtung von Wissenschaft und Regierung hatte dort bereits direkt nach dem Ersten Weltkrieg begonnen und wurde häufig als »sozialistische« Eigenheit der sowjetischen Wissenschaft wahrgenommen. Europäische

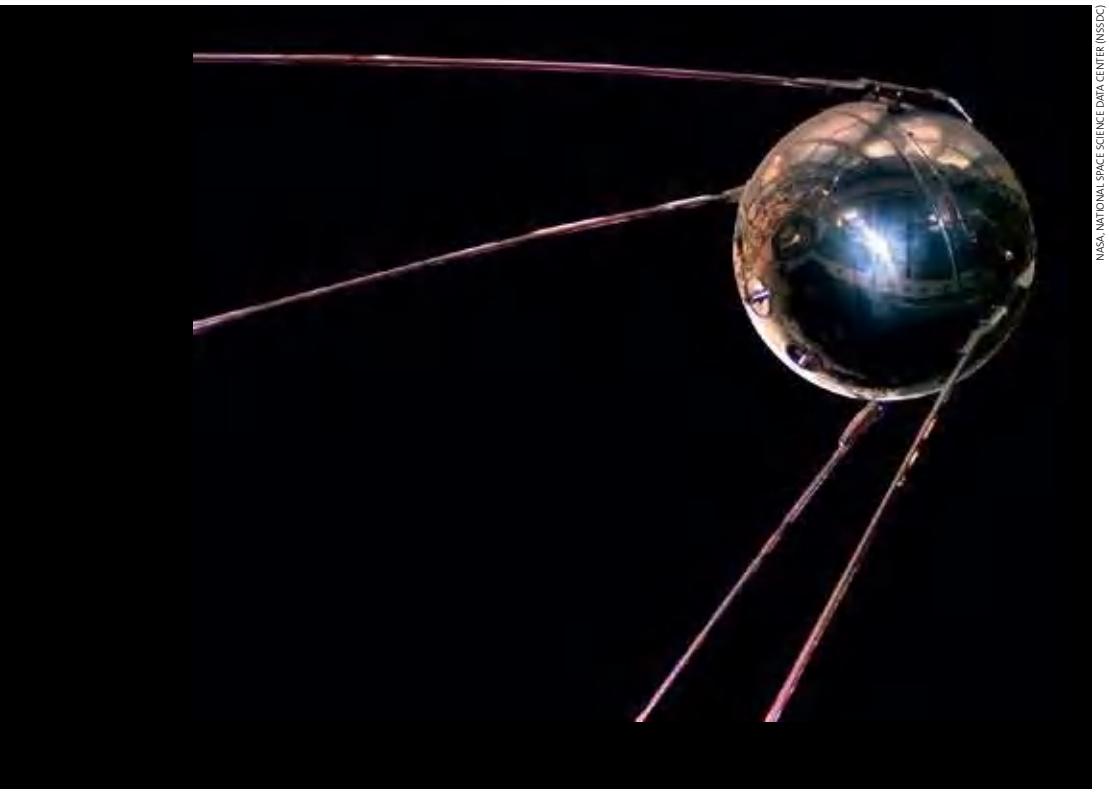
AUF EINEN BLICK

MOBILMACHUNG DER WISSENSCHAFT

1 Schon vor dem Zweiten Weltkrieg genossen Wissenschaft und Technik in der Sowjetunion mehr **staatliche Förderung** als in den privatwirtschaftlich organisierten Ländern des Westens. Der Krieg erzwang die komplette **Militarisierung** der Forschung.

2 Auch in der nachfolgenden **Ära des Kalten Kriegs** standen militärische Forschungsziele im Vordergrund. Insbesondere die **Nukleartechnik** und der Bau mächtiger **Raketen** hatten oberste Priorität.

3 Mit dem Start des **Sputniks** demonstrierte die UdSSR aller Welt ihre wissenschaftlich-technischen Fähigkeiten. Daraufhin intensivierte der Westen die staatliche Förderung von wissenschaftlicher Ausbildung und Grundlagenforschung.



NASA, NATIONAL SPACE SCIENCE DATA CENTER (NSSDC)

Am 4. Oktober 1954 brachte die Sowjetunion mit Sputnik 1 den ersten künstlichen Satelliten in die Erdumlaufbahn. Im Westen löste der überraschende Erfolg den »Sputnikschock« aus und führte zu mehr staatlicher Förderung der Wissenschaft.

Beobachter stellten schon 1930 fest, dass das Sowjetregime der Wissenschaft einen größeren Anteil des Nationaleinkommens zufließen ließ als die Regierungen ökonomisch weiter entwickelter und reicherer Länder. Die Sowjets lehnten die Ideologie einer reinen Wissenschaft ab und förderten stattdessen das Ideal potenziell verwertbaren Wissens. Sie professionalisierten die Forschung, indem sie öffentlich finanzierte Labore und Institute gründeten, deren Wissenschaftler und Ingenieure hauptsächlich mit Forschungsaufgaben und nicht mit Lehrtätigkeiten betraut waren. Zudem übten sie großen Druck auf die bestehenden Teams aus, ihre Arbeit an wirtschaftlichen und sozialen Bedürfnissen auszurichten, und betonten zu diesem Zweck die Notwendigkeit rationaler Organisation und Planung.

Zumindest einige Elemente des sowjetischen Modells riefen bei ausländischen Kollegen – insbesondere linken – großes Interesse hervor und stießen Reformen an, so in Frankreich unter der Volksfrontregierung Mitte der 1930er Jahre. Auch in Großbritannien und den USA forderten linke Wissenschaftler damals größere staatliche Unterstützung, konnten sich aber gegen den starken politischen Widerstand, auf den solche sozialistischen Vorschläge trafen, zunächst nicht durchsetzen. Doch der drohende Zweite Weltkrieg drängte schließlich die Vorbehalte gegen staatliche Eingriffe in die wissenschaftliche Forschung zurück; der Preis dafür war die fast vollständige Militarisierung der Wissenschaft.

Als die Sowjetunion sich 1945 die Aufgabe stellte, den amerikanischen Bau der Atombombe zu kopieren, kehrte somit ihre eigene Idee wissenschaftlicher Großprojekte zurück. Das Ausmaß der benötigten Ressourcen war gigantisch; dies belastete die durch den Krieg weit gehend zerstörte Wirtschaft schwer.

Der Physiker Igor Kurtschatow (1903–1960) und andere Nuklearwissenschaftler sahen die Arbeit an der Atombombe als direkte Fortführung ihrer Anstrengungen während des Kriegs, als eine Disziplin und Selbstaufopferung erfordernde Notwendigkeit der Landesverteidigung. Kurtschatow war dafür bekannt, seine Briefe gelegentlich mit »Soldat Kurtschatow« zu unterzeichnen. Seine Haltung gegenüber Partei und Regierung war die eines Musteroffiziers: Er kümmerte sich ausschließlich um den ihm zugewiesenen Aufgabenbereich und befolgte politische Befehle. Bezeichnenderweise hatte der zukünftige wissenschaftliche Leiter des sowjetischen Atomprojekts bereits vor dem Krieg von seinen akademischen Kollegen den Spitznamen »General« erhalten.

Motivation und Prestige

Stalin pflegte führenden Wissenschaftlern gegenüber eine ähnliche Haltung wie zu hochrangigen Militärs. In den ersten Nachkriegsjahren sorgte er dafür, dass die Wissenschaft und ihre Vertreter zu beinahe ebenso großem Ansehen kamen wie die politischen und militärischen Eliten. Stalin verschaffte den Wissenschaftlern zwar keine politische Macht – die Partei durfte diese ja nicht abgeben –, dafür jedoch ähnliche Privilegien wie der Parteinomenklatura. Unter Vermeidung des im offiziellen Diskurs unzulässigen Worts »Privilegien« versprach Stalin am 9. Februar 1946 in einer öffentlichen Rede den sowjetischen Bürgern zweierlei: ein Ende der Rationie-

rung und die »großzügige Einrichtung von wissenschaftlichen Forschungsinstituten aller Art«. Er habe keinen Zweifel daran, versicherte er, »dass unsere Gelehrten, wenn wir ihnen die erforderliche Unterstützung angedeihen lassen, im Stande sein werden, die Errungenschaften der Wissenschaft außerhalb unseres Landes nicht nur einzuholen, sondern auch in nächster Zeit zu übertreffen«.

Wie für andere Eliten der stalinistischen Gesellschaft bedeuteten mehr Privilegien für die Wissenschaftler zugleich mehr Gefahren: aufmerksame Begutachtung und strengere Kontrollen. Kurtschatow wurde 1949 bei der Reparatur eines versagenden Atomreaktors starker Strahlung ausgesetzt; er starb bereits im Alter von 57 Jahren. Doch viele Wissenschaftler betrachteten die Risiken und Opfer am Arbeitsplatz als selbstverständlich – gerade im Vergleich zu den noch weitaus größeren Opfern, die Soldaten und Zivilisten während des Kriegs gebracht hatten.

Ideologische Anpassung

Im Sommer 1946 kam die sowjetische Führung zu dem Schluss, das Bündnis mit Großbritannien und den USA sei unhaltbar geworden und die früheren Verbündeten würden sich aller Voraussicht nach zu Widersachern entwickeln. Der Wandel sollte der sowjetischen Öffentlichkeit durch eine Reihe von einschlägigen Publikationen erklärt werden, die von Agitprop, der Abteilung für Agitation und Propaganda im Zentralkomitee, aufeinander abgestimmt wurden.

Im Juli und August begannen das Wirtschafts- und das Rechtsinstitut der Akademie der Wissenschaften die angeblich allzu wohlwollenden Berichte über die britische und amerikanische Wirtschaft und Politik zu kritisieren. Offenbar auf Grund dieser Kritik wurde die Ausgabe 8/9 der offiziellen Akademiezeitschrift »Westnik Akademii Nauk« zunächst zurückgehalten; als sie schließlich erschien, zeigten sich in ihr die verschärften ideologischen Vorgaben. Zuvor hatten sowjetische Autoren jüngste Entwicklungen in Großbritannien und den USA als Annäherung zwischen den Lagern beschrieben, indem sie die dort während des Kriegs zu beobachtende größere Rolle des öffentlichen Sektors und der staatlichen Regulierung als »sozialistische Tendenzen« deuteten. Die erneute ideologische Konfrontation verlangte von den sowjetischen Medien nun stattdessen eine äußerst polemische Kritik des Kapitalismus, des Imperialismus und der Kriegstreiberei Amerikas und Großbritanniens. Die von kommunistischen und linken Aktivisten organisierte internationale Friedensbewegung forderte damals im Einklang mit der offiziellen sowjetischen Position die Abschaffung der Atomwaffen.

Die zunehmend aufgeheizte Atmosphäre des Kalten Kriegs zerstörte rasch die zarten Keime des Internationalismus. Auf Grund früherer Vereinbarungen reiste Anfang 1947 eine hochkarätige Delegation sowjetischer Mediziner in die Vereinigten Staaten. Dort besprachen sie unter anderem das Vorhaben, ein Buch zweier russischer Forscher über eine aussichtsreiche neue Krebstherapie zu übersetzen und in den USA zu veröffentlichen. In der Sowjetunion löste dies einen großen politischen Skandal aus: Die Weitergabe eines Manuskripts an Ausländer wurde als Verrat von Staatsgeheimnissen dargestellt. Der Fall kostete einige Beamte des Gesundheitsministeriums die Karriere und wegen Spionagevorwürfen sogar die Freiheit, während die Verfasser des Buchs mit öffentlicher Schelte überzogen wurden. Das Zentralkomitee wies den Gesundheitsminister an, für den Fall eigens ein »Ehrengericht« einzurichten. In der öffentlichkeitswirksamen Gerichtsverhandlung wurde den medizinischen Forschern unpatriotisches Verhalten vorgeworfen, um damit allen sowjetischen Wissenschaftlern deutlich zu machen, dass

GETTY IMAGES / AFP

Die Zerstörung der japanischen Städte Hiroschima und Nagasaki durch amerikanische Atombomben im August 1945 markiert das Ende des Zweiten Weltkriegs und den Beginn des Kalten Kriegs. Die Aufnahme zeigt die Ruine der Industrie- und Handelskammer im Zentrum von Hiroschima.

MIT FRDL. GEN. VON G. KOWALSKI AUS KOROLJOWA N.S.: SERGEJ P. KOROLJOW – OTEZ. BAND 1. VERLAG NAUKA, MOSKAU 2007

Sergei Koroljow (1907–1966) war als Chefingenieur für den Bau von Großraketen verantwortlich. Das Bild zeigt ihn nach Kriegsende im besetzten Deutschland.

die Weitergabe wertvoller wissenschaftlicher Informationen an ausländische Kontrahenten nicht akzeptabel sei.

Der Kalte Krieg schränkte die internationalen Kontakte der sowjetischen Wissenschaftler gravierend ein. Auslandsreisen oder die Teilnahme an internationalen Tagungen waren zwar nicht offiziell verboten, galten jedoch grundsätzlich als Sicherheitsrisiko – insbesondere bei den Bürokraten, die über die Anträge für Delegationsreisen entschieden. Diese Prozedur erforderte nun die Zustimmung eines umfangreichen hierarchischen Apparats und dauerte deutlich länger als ein Jahr. Selbst wenn keine der Instanzen ernsthafte Vorbehalte äußerte, fiel die Entscheidung häufig nicht rechtzeitig für die jeweilige internationale Konferenz. In den frühen 1950er Jahren beendete die Sowjetunion zudem ihre Mitgliedschaft in den meisten internationalen akademischen Vereinigungen und Organisationen.

Geheimhaltung und Angst vor Spionage ließen die Paranoia ausufern. Wissenschaftliche Einrichtungen stellten Sicherheitsbeamte ein, die das Personal überwachten. Persönliche Kontakte, Briefverkehr und informelle Kommunikation mit ausländischen Kollegen waren nun überaus riskant; reguläre Wissenschaftspublikationen in Bibliotheken stellten den wichtigsten verbleibenden Informationskanal durch den Eisernen Vorhang dar. In vielen akademischen Disziplinen erforderte eine Veröffentlichung die Freigabe durch einen Sicherheitsbeamten im Institut, insbesondere bei Themen, die auch nur nominell mit Atomforschung zu tun hatten. Während amerikanische Wissenschaftler Kongressabgeordnete davon überzeugen mussten, dass der Handel mit radioaktiven Isotopen für medizinische Zwecke kein Sicherheitsrisiko darstelle, legte die sowjetische Akademie der Wissenschaften dem Zentralkomitee Memoranden darüber vor, warum die Forschung über kosmische Strahlung keiner Geheimhaltung bedürfe.

Das ideologische Bild der sowjetischen Wissenschaft musste der neuen Rolle der Sowjetunion als Supermacht entsprechen. Die Forscher erhielten nun Lektionen in Patriotismus: Man warnte sie vor »Unterwürfigkeit gegenüber dem Westen« und dem Klischee, Geschichte und Gegenwart der russischen Wissenschaft seien durch Abhängigkeit vom Westen bestimmt. Mit großem rhetorischem Einsatz versuchten Wissenschaftshistoriker einen russischen Anspruch auf Entdeckungen und Erfindungen zu beweisen, die traditionell Ausländern zugesprochen wurden. Das »Journal of Physics« – die letzte akademische Zeitschrift in der Sowjetunion, die noch englische Übersetzungen von Aufsätzen sowjetischer Forscher abdruckte – gab solchen Prestigeansprüchen 1947 nach. In einem Brief an das Agitprop-Komitee erklärte sie, dass amerikanische Zeitschriften keine Artikel auf Russisch veröffentlichten und es deshalb auch nicht länger hinnehmbar sei, wenn sowjetische Wissenschaftler ihre Forschungsergebnisse auf Englisch publizierten.

In vielen Forschungsfeldern kam es zu Konflikten darüber, ob man sich an den Leistungen der amerikanischen Wissenschaft messen oder eigene Wege verfolgen solle. Angesichts der beherrschenden Rolle der US-Forscher waren auch andere europäische Länder nach dem Zweiten Weltkrieg mit dieser Frage konfrontiert und entschieden sich gewöhnlich dafür, den Trends in Übersee zu folgen. Die Alternative dazu – die Konkurrenz durch eigenständige Forschungswege auszutragen, wie es im wissenschaftlichen Wettstreit zwischen den führenden europäischen Nationen des 19. Jahrhunderts üblich gewesen war – wurde zwar gelegentlich in Betracht gezogen, meist jedoch als weniger aussichtsreich oder zu riskant verworfen.

Bomben und Raketen

In der Sowjetunion bot der Kalte Krieg für beide Strategien ideologische Anknüpfungspunkte. Beim Bau der Atombombe setzte man, jedenfalls zu Beginn und in entscheidenden Phasen, auf eine Nachahmung des amerikanischen Manhattanprojekts, während in der Raketentechnik ein Entwicklungspfad eingeschlagen wurde, der sich deutlich von dem zeitgleich in den USA verfolgten unterschied. Teilweise erklärt sich dies durch die besondere Bedeutung der Raketen-

Mit der zweistufigen R7 (rechts: Konstruktionszeichnung; unten: Foto vor dem Start) schuf Sergei Koroljow nicht nur die erste Interkontinentalrakete, sondern auch eine Grundlage für die größten Erfolge der Sowjetunion in der Raumfahrt – vom Erdsatelliten Sputnik bis zur ersten bemannten Raumfahrt von Juri Gagarin 1961.

UNTEN: MIT FRDL. GEN. VON HARRO ZIMMER; OBEN: MIT FRDL. GEN. VON A. KOLEWNIKOW / TASS

technologie für die Sowjetunion, die sich aus dem strategischen Ungleichgewicht in der ersten Hälfte des Kalten Kriegs ergab. Während amerikanische Atombomber von Basen in Europa und Asien tief in sowjetisches Territorium eindringen konnten, verfügte die UdSSR über keine vorgeschobenen Stützpunkte, von denen aus sie die Vereinigten Staaten zu erreichen vermochte. Um die Entwicklung eines alternativen Trägersystems zu beschleunigen, setzten sowjetische Funktionäre bereits 1953 die angepeilte Traglast für die zukünftige Interkontinentalrakete auf drei Tonnen fest – auf Grundlage einer Maximalschätzung, da ihnen das genaue Gewicht der Wasserstoffbombe noch nicht bekannt war. Diese Größenvorgabe drängte das Team des Raketenkonstrukteurs Sergei Koroljow (1907–1966) dazu, einige Stufen zu überspringen und im Eiltempo die weltweit erste Interkontinentalrakete zu entwickeln, eine zweistufige R7 mit einer Reichweite von 7000 Kilometern. Damit wurde der amerikanische Kontinent erreichbar, und die Sowjetunion verfügte zum ersten Mal über die Möglichkeit von Vergeltungsschlägen und folglich über eine wirksame Abschreckung.

Die schwierige Entscheidung zwischen Nachahmung und Autonomie führte je nach Forschungsdisziplin zu unterschiedlichen Ergebnissen. Am verheerendsten war der Stillstand der Genetik, nachdem es dem Getreidezüchter Trofim Lyssenko (1898–1976) 1948 gelungen war, Stalin von der Überlegenheit seiner Züchtungstheorie gegenüber der »formalen« und »idealistischen« mendelschen Vererbungslehre zu überzeugen. Ein Erfolgsbeispiel boten hingegen die Physiker Jakow Frenkel (1894–1952) und Lew Landau (1908–1968), die ausgehend von dem sowjetischen Konzept »kollektivierter Teilchen« – in moderner Terminologie als Quasiteilchen bekannt – neue Grundlagen der Festkörperphysik entwickelten. Häufiger folgten sowjetische Wissenschaftler jedoch Stalins Losung vom »Einholen und Überholen«. In der Praxis bedeutete dies, weit gehend den strategischen Zielen der amerikanischen Wissenschaft zu folgen und dabei keine Mühe zu scheuen, aber möglichst mit weniger Kosten auszukommen. Gewöhnlich konnten die sowjetischen Wissenschaftler ihren Rückstand nicht ganz ausgleichen; mit etwas Glück erzielten sie aber mitunter – wie im Fall der Wasserstoffbombe – sogar einen Vorsprung.

Beginn der Entspannung

Die extreme Form einer auf den Kalten Krieg zugeschnittenen Wissenschaft, die sich bis 1950 herausgebildet hatte, war nicht von Dauer. Vor allem der erfolgreiche Abschluss des Atomwaffenprojekts veränderte die Situation wesentlich: 1949 testete die Sowjetunion ihre erste Atombombe, 1953 den ersten Prototyp der Wasserstoffbombe und 1955 die erste voll funktionstüchtige H-Bombe. Manche sowjetische Spitzenwissenschaftler, die an dem Projekt mitgearbeitet hatten, betrachteten damit ihre Mission als erfüllt und wollten weitere Verbesserungen den Ingenieuren überlassen. Viele verließen den Bereich geheimer Militärforschung und kehrten an zivile Institute in den Großstädten zurück, um sich der

Grundlagenforschung zu widmen. Die Kriegsmentalität in den Köpfen der Wissenschaftler wich der Friedenssehnsucht. Beziehungen zum Militär und Geheimhaltung wurden nicht länger mit höchstem Prestige verbunden, sondern zunehmend mit zweitrangiger Wissenschaft und Ingenieurwesen.

Die sowjetischen Politiker waren erleichtert, dass das Sicherheitsproblem des Landes mit Hilfe der nuklearen Abschreckung entspannt werden konnte. Sie belohnten die Wissenschaftler mit mehr Ressourcen und mehr Freiheit in der Wahl ihrer Forschungsthemen, die sich nun an der internationalen Wissenschaft statt an Militärprojekten orientieren konnten. Nach Stalins Tod 1953 stand die Führung vor der Aufgabe, die politische Strategie des Landes neu zu definieren. In der Hoffnung, internationale Spannungen abbauen zu können, beschloss sie eine Förderung der Wissenschaftsdiplomatie und begann, die Beschränkung von internationalen Kontakten und Kongressreisen aufzuheben. Außerdem erlaubte sie nun die Nominierung sowjetischer Wissenschaftler für den Nobelpreis.

Seit die sowjetischen Tests das amerikanische Atomwaffenmonopol beendet hatten, ließ auch die US-Politik eine gewisse Kooperation in nuklearen Fragen zu. Die von Präsident Dwight D. Eisenhower im Dezember 1953 gestartete Initiative »Atoms for Peace« führte 1955 zur ersten Genfer Atomkonferenz, auf der die Geheimhaltung der Forschung über Atomreaktoren aufgegeben und ein internationaler Rahmen für die friedliche Nutzung der Kernenergie geschaffen wurde. Die Sowjetunion begrüßte diese Entwicklung, da sie ausgezeichnet zum neuen politischen Kurs passte. Im April 1956 begleitete Kurtschatow den sowjetischen Premier Nikita Chruschtschow auf einem Staatsbesuch nach England und erregte mit einer Rede im Atomforschungszentrum Harwell politisches und wissenschaftliches Aufsehen: Er legte die Resultate und Methoden des streng geheimen sowjetischen Forschungsprogramms zur kontrollierten Kernfusion offen. Dies hatte zur Folge, dass 1957 auch Großbritannien und die USA ihren Forschungsstand auf diesem Gebiet freigaben und eine Weiterentwicklung im internationalen Rahmen zuließen.

Wissenschaftlich-technische Entwicklungen veränderten sogar politische Grundprinzipien des Kalten Kriegs. 1954 verfasste Kurtschatow mit einem Team von Funktionären und Wissenschaftlern einen Bericht für das Politbüro über die möglichen Folgen eines Atomkriegs. Das Memorandum kam zu dem Schluss, ein großer atomarer Konflikt sei prinzipiell nicht zu gewinnen, sondern würde zur gegenseitigen Vernichtung führen und die menschliche Zivilisation auslöschen. Dieses Ergebnis war politisch schwer hinnehmbar, denn es bewegte sich am Rande des Defätismus. Gemäß Stalins Militärdoktrin hätte sich die UdSSR gegen jeglichen Angriff behaupten müssen. Doch Chruschtschow opferte Militärdoktrin und ideologische Prinzipien schließlich zu Gunsten der Auffassung der Experten. 1956 verkündete er die neue Doktrin der »friedlichen Koexistenz«, die bis zum Ende der Sowjetunion gültig blieb. Demnach war es auf Grund der atomaren Abschreckung möglich, größere Kriege zu vermeiden und den Frieden zu wahren. Der globale Konkurrenzkampf zwischen Sozialismus und Kapitalismus sollte fortan nur auf ökonomischer und ideologischer Ebene ausgetragen werden.

Der Sputnikschock

Eigentlich bauten Koroljow und sein Team die Interkontinentalrakete R7 nicht für die Raumfahrt, sondern zur strategischen Verteidigung ihres Heimatlands; die Rakete von 1956 entstammte einem hochgeheimen Militärprojekt und war als Waffe konzipiert. Der Wettlauf ins All beschäftigte zu die-

In einer programmatischen Rede gab Staatschef Josef Stalin 1946 die Parole aus: »Einholen und Überholen« (links). Insbesondere sollten Interkontinentalraketen entwickelt werden, um mit der Bomberflotte der USA gleichzuziehen. Denn bis dahin besaß die UdSSR nur primitive Raketen (rechts).

ARCHIV KOJEWNIKOW

MIT FRDL. GEN. VON A. KOJEWNIKOW / TASS

sem Zeitpunkt weder Politiker noch Öffentlichkeit; der Start des ersten künstlichen Erdsatelliten »Sputnik« verdankte sich einem glücklichen Zusammentreffen.

Einige Ingenieure hingen noch den Jugendträumen vom Flug ins All nach, die sie einige Jahrzehnte zuvor zum damals noch amateurhaften Raketenbau geführt hatten. Schon während der Entwicklungsphase der R7 begann eine kleine Gruppe an Entwürfen für Sputniks und bemannte Raummissionen zu arbeiten. Um die R7-Rakete in die Lage zu versetzen, Frachten ins All zu befördern, waren nur geringfügige Modifikationen erforderlich. Als sich Chruschtschow 1956 bei einer Inspektion sehr zufrieden mit der Arbeit an der R7 zeigte, nutzte Koroljow den günstigen Augenblick und bat um die Erlaubnis, bei einem der anstehenden Raketentests einen Sputnik ins All zu schießen. Chruschtschow verlangte die Zusicherung, dass dies nicht zu Verzögerungen des Hauptprojekts führen würde; schließlich willigte er ein, obwohl er den Wunsch der Konstrukteure ein wenig kindisch fand. Ohne auf die Fertigstellung weiter entwickelter Satelliten zu warten, entschied Koroljow, den »einfachsten Sputnik«, wie er in der internen Dokumentation hieß, fertig zu stellen, um nebenbei zu zeigen, dass Funksignale durch die Ionosphäre zu dringen vermögen. Obgleich sich die R7 noch in einem Stadium befand, in dem bei jedem zweiten Test Probleme auftraten, verlief der Start des Sputniks am 4. Oktober 1957 völlig reibungslos – nur sechs Wochen nach dem ersten erfolgreichen militärischen Test der Interkontinentalrakete.

Selbst die beteiligten Ingenieure hatten nicht geahnt, was für ein politisches Erdbeben sie damit auslösten. Über Nacht avancierte der Sputnik zur Weltsensation. Der Traum vom All war nicht länger das Monopol vieler Sciencefictionfans und einiger Ingenieure, sondern bannte die Aufmerksamkeit des politischen Establishments und der Massenmedien in aller Welt. Der sowjetischen wie der amerikanischen Regierung wurde die öffentliche Bedeutung des Sputniks erst im Nachhinein schlagartig klar. Während die Sowjets die Neigung westlicher Medien zur Sensationslust gewöhnlich verachteten, kam sie ihnen in diesem Fall durchaus gelegen: Um den Sputnikstart im In- und Ausland als Beweis für die Überlegenheit des Sozialismus anzupreisen, setzten sie ihre Propagandamaschine in Gang. Die kulturelle Bedeutung des Ereignisses erwies sich jedoch auf lange Sicht als einflussreicher und wichtiger als die tagespolitisch-propagandistische Verwertung.

Als Resultat geheimer Forschungsarbeiten war Sputnik eine kaum verhüllte strategisch-militärische Machtdemonstration. Doch was die Menschen in aller Welt bewunderten, war nicht die Rakete, die das Objekt in den Weltraum beförderte, sondern der Sputnik selbst – eine harmlose Metallkugel von der Größe eines Basketballs, die mit Funksendern und -antennen ausgerüstet war und sonderbare Piepstöne von sich gab. Die Gleichgültigkeit, mit der die Öffentlichkeit die Nachricht vom ersten militärischen Test der R7 aufnahm, und die Begeisterung, mit der sie zwei Monate später reagierte, als dieselbe Rakete den Sputnik in die Erdumlaufbahn brachte, zeigte, dass die Menschen vom exzessiven Militarismus des Nachkriegsjahrzehnts genug hatten und froh waren, wenn statt der Atombombe ein Satellit den Gipfel des wissenschaftlichen Fortschritts symbolisierte. Im Rückblick war Sputnik ein Wendepunkt, von dem an die Militarisierung der internationalen Wissenschaft zurückging – zwar nicht absolut, aber doch relativ zum allgemeinen Forschungsaufwand.

Nachwirkungen im Westen

Eine weitere Folge des Sputnikschocks war, dass bestimmte Wissenschaftspraktiken, die bis dahin als sowjetische Eigentümlichkeiten abgetan worden waren, nun international akzeptiert und kopiert wurden – zuallererst in den USA. Nach dem Start des Sputniks erhöhten die Vereinigten Staaten ihren Wissenschaftsetat deutlich, wobei die Gelder nun nicht nur durch militärische, sondern auch durch zivile oder angeblich zivile Kanäle wie die National Science Foundation (NSF) oder die Weltraumbehörde NASA flossen. Die Institutionen, die diese Finanzströme lenkten, gaben die zuvor un-

MIT FRDL. GEN. VON A. KOJEWNIKOW, AUS NEGIN, E. A. (HG.): SOVETSKII ATOMNYI PROJECT. SAROV 2000

Um im nuklearen Wettrüsten gleichzuziehen, investierte die Sowjetunion große Anstrengungen in den Bau von Uran-, Plutonium- und Wasserstoffbomben. Das Bild zeigt vermutlich die erste Testexplosion einer sowjetischen Plutoniumbombe im Jahr 1949.

Igor Kurtschatow, der »Vater der sowjetischen Atombombe« (1903–1960, rechts), sitzt auf dieser Aufnahme von 1957 neben dem »Vater der sowjetischen Wasserstoffbombe« Andrei Sacharow (1921–1989).

AIP EMILIO SEGRÈ VISUAL ARCHIVES, PHYSICS TODAY COLLECTION

angefochtene Idee der »reinen« Wissenschaft auf. Über Jahrzehnte hatte der Westen den Sowjets vorgeworfen, den Wert der reinen Forschung zu leugnen, indem sie verlangt hätten, fortgeschrittene Wissenschaft solle in erster Linie neue Technologien und Nutzanwendungen hervorbringen. Im Gefolge des Sputnikstarts wurde die sowjetische Position auch in den USA und Westeuropa allmählich offiziell akzeptiert.

Nicht zuletzt veränderte der Sputnik die Demografie der wissenschaftlichen Berufe. Der sowjetische Erfolg wurde, teilweise zu Recht, dem sozialistischen Bildungssystem zugeschrieben, das bereits seit geraumer Zeit einen größeren Anteil der Bevölkerung zu hoch qualifizierten Wissenschaftlern und Ingenieuren ausbildete, als es im Westen der Fall war. Die Ausweitung der höheren Bildung in der UdSSR seit den 1920er Jahren hatte auf der ideologischen Überzeugung beruht, Wissenschaft solle nicht einer Elite vorbehalten bleiben, sondern in die Berufsausbildung breiter Bevölkerungsschichten einfließen. Mit Maßnahmen, die man heute als »positive Diskriminierung« bezeichnen würde, wurden gezielt zahlreiche Angehörige unterprivilegierter und weniger gebildeter Schichten sowie Frauen und ethnische Minderheiten wissenschaftlich qualifiziert. In den USA veränderte sich die Demografie der wissenschaftlichen Berufe allmählich in eine ähnliche Richtung – teilweise infolge des National Defense Education Act von 1958, vor allem aber durch neue Einwanderungsbestimmungen, die schließlich im Immigration Act von 1965 gipfelten. Rassische Quotierungen wurden darin durch die Bevorzugung von qualifizierten Spezialisten aus anderen Ländern abgelöst.

Darüber klagten als Erste die Briten. Bereits 1962 legte die Royal Society einen Bericht über die Abwanderung britischer Wissenschaftler in die USA vor, der den Ausdruck »Braindrain« prägte. In den ersten Jahren nach dem Sputnikschock stammte etwa die Hälfte der in die USA eingewanderten Wissenschaftler aus Europa, insbesondere aus Großbritannien und Deutschland. Der Anteil von Spezialisten und Technikern unter den Immigranten stieg bis 1960 auf 17,9 Prozent und bis 1970 auf 29,4 Prozent – mehr als doppelt so viel wie in der amerikanischen Gesamtbevölkerung.

Mit der Zeit veränderten sich dann die Muster des Braindrains: Ein wachsender Anteil der eingewanderten Wissenschaftler ging für weiterführende Studien in die USA und verfügte noch über keinen Doktortitel. Während der Anteil der Europäer allmählich zurückging, nahm der von Wissenschaftlern aus Indien, Taiwan, Südkorea und später auch aus anderen Entwicklungsländern beträchtlich zu. Dass wissenschaftliche Berufe in den USA und weltweit heute nicht nur insgesamt von mehr Menschen ausgeübt werden, sondern auch wesentlich stärker multiethnisch und multikulturell geprägt sind, ist eine der wichtigsten – wenngleich unbeabsichtigten – großen Folgen des kleinen Sputniks.

DER AUTOR

Alexei B. Kojewnikow studierte Physik an der Universität Moskau und promovierte dort 1989 in Wissenschaftsgeschichte. Nach Studienaufenthalten am Max-Planck-Institut (MPI) für Physik in München als Humboldt-Stipendiat und am MPI für Wissenschaftsgeschichte in Berlin lehrte und forschte er ab 1996 in den USA. Seit 2006 ist er Associate Professor an der University of British Columbia in Vancouver (Kanada).

QUELLEN

Holloway, D.: Stalin and the Bomb: The Soviet Union and Atomic Energy, 1939–1956. Yale University Press, New Haven 1994
Ivanov, K.: Science after Stalin: Forging A New Image of Soviet Science. In: Science in Context 15, S. 317–338, 2002
Kojevnikov, A.: Stalin's Great Science: The Time and Adventures of Soviet Physicists. Imperial College Press, London 2004
McDougall, W. A.: The Heavens and the Earth: A Political History of the Space Age. Basic Books, New York 1985

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1149649**

Das große Sterben

Weltweit sind die Amphibien vom Aussterben bedroht, zahllose Arten existieren bereits nicht mehr. Schuld daran: eine aggressive Pilzerkrankung.

Von Joseph R. Mendelson III

Im ersten Jahr meiner wissenschaftlichen Tätigkeit an der University of Texas in Arlington (USA) unternahm ich eine Forschungsreise nach Guatemala. Ich sollte Lurche (Amphibien) und Kriechtiere (Reptilien) im Umland einer Kaffeeplantage im Departement Alta Verapaz untersuchen. Also brach ich auf – allein, ohne Spanischkenntnisse und im Bewusstsein, dass ich mitten in einer Bürgerkriegsregion arbeiten würde. Meine Befürchtungen wurden dadurch aufgewogen, dass ich mich in den Fußstapfen all jener unerschrockenen Naturhistoriker und Entdecker wähnte, deren Monografien ich so eifrig gelesen hatte.

In jenem Sommer 1989 erstellte ich eine recht ansehnliche Reptiliensammlung, doch meine Amphibienkollektion fiel mehr als dürftig aus. Offenbar, so glaubten meine Betreuer und ich, fehlte es mir ganz einfach an Erfahrung mit diesen Tieren. Schließlich komme ich aus Südkalifornien, wo es jede Menge Kriechtiere gibt, aber kaum Lurche. Heute, gut 20 Jahre später, ist jedoch klar, dass ich damals Zeuge eines Massensterbens geworden war, ohne mir dessen bewusst zu sein.

Die Forschungsreise nach Guatemala legte den Grundstein für meine wissenschaftliche Karriere als Herpetologe (Amphibien- und Reptilienforscher). Tatsächlich entdeckte ich bei dieser Expedition zum ersten Mal eine unbekannte Froschart. In den Jahren, die seither vergangen sind, habe ich dutzende weitere neue Arten identifiziert und benannt. Manche dieser Spezies stöberte ich allerdings nur im Museumsregal auf: Sie waren in freier Wildbahn bereits ausgestorben, noch bevor ihnen jemand einen wissenschaftlichen Namen gegeben hatte. Eigentlich bin ich Herpetologe geworden, weil ich gern mit lebenden Tieren in der Natur zu tun habe. Doch wenn ich auf meine Arbeit der vergangenen Jahre zurückschaue, scheint es mir, als müsse ich meine Berufsbezeichnung ändern – in »forensischer Taxonom«.

Immer wieder passiert es mir und anderen Herpetologen, dass wir eine neue Spezies benennen und zugleich wissen, dass sie wahrscheinlich schon verschwunden ist. Ein eindrucksvolles Beispiel hierfür bietet Rabbs Fransenzehen-Laubfrosch *(Ecnomiohyla rabborum)*, eine spektakuläre neue Froschart, die meine Kollegen und ich 2005 in Zentralpanama entdeckten. Wissenschaftlich beschrieben wurde sie erstmals in der Fachzeitschrift »Journal of Herpetology«. Der entsprechende Aufsatz erschien 2008 – ein Jahr, nachdem das letzte frei lebende Tier gesichtet worden war. Während ich dies schreibe, lebt noch genau ein Exemplar von *Ecnomiohyla rabborum* in menschlicher Obhut; es ist männlich. Die Art ist damit augenscheinlich ausgestorben.

Von *Batrachochytrium dendrobatidis* dahingerafft

Das Schicksal des Rabbs Fransenzehen-Laubfroschs steht stellvertretend für das unzähliger weiterer Arten. Auf der ganzen Welt spielt sich derzeit ein Massensterben der Amphibien ab. Es verändert die Ökosysteme in einer Weise, die wir kaum verstehen, und es vermittelt uns schmerzhafte Lektionen darüber, wo die Grenzen von Wissenschaft und Naturschutz verlaufen. Das große Verschwinden der Lurche geht nicht allein auf die üblichen Verdächtigen wie Waldrodungen, Trockenlegungen, Klimawandel, Umweltverschmutzung oder Nahrungsgewinnung zurück. Schuld ist vor allem der Chytridpilz *Batrachochytrium dendrobatidis*. Er verursacht die Amphibienkrankheit Chytridiomykose, hat sich als äußerst ansteckend erwiesen und vernichtet selbst große und stabile Populationen auf einen Schlag. Spezies, die sonst in keiner Weise gefährdet sind, sterben nach dem Einschleppen dieses Erregers in kürzester Zeit aus.

Batrachochytrium dendrobatidis wurde vor einigen Jahren entdeckt. In der so genannten Thallusphase seines Lebenszyklus bilden die Pilzzellen flaschenförmige Strukturen in der obersten Hautschicht (Epidermis) der Amphibien.

AUF EINEN BLICK

KRISE DER LURCHE

1 Auf fast allen Kontinenten sterben massenhaft Amphibien. **Zahllose Spezies sind bereits verschwunden**, darunter viele, die noch nicht wissenschaftlich beschrieben waren.

2 Die Hauptschuld an dieser Katastrophe scheint ein **Pilz** zu tragen. Er zerstört die **Barrierefunktion der Amphibienhaut** und befällt vermutlich sämtliche Lurcharten.

3 Naturschutzorganisationen haben Programme wie die **»Amphibienarche«** aufgelegt. Das Ziel lautet, gefährdete Arten unter menschlicher Obhut vor dem Aussterben zu bewahren.

Dort baut der Pilz Faserproteine (Keratine) ab, die in der Haut des Wirtstiers vorkommen. Später produziert er frei bewegliche, begeißelte Zoosporen, die sich über das Wasser verbreiten. Wahrscheinlich ist der Chytridpilz in der Lage, jede der weltweit knapp 7000 Amphibienarten zu infizieren. Damit könnte er so viele Wirtsorganismen befallen wie kein anderes bekanntes Pathogen. Die Reaktion der Wirte reicht von vollständiger Toleranz bis hin zum raschen Tod, wobei die Tiere an einem Herzstillstand auf Grund osmotischen Ungleichgewichts verenden. Denn die Keratine, die der Pilz abbaut, sichern unter anderem die Barrierefunktion der Epidermis. Werden sie zerstört, treten Wasser und gelöste Stoffe in toxischen Mengen durch die Lurchhaut, wodurch die Zell-, Gewebe- und Organfunktionen des Tiers zusammenbrechen.

Zur Verbreitung der Krankheit tragen tolerante Wirte wie der Amerikanische Ochsenfrosch *(Lithobates catesbeianus)* bei, der vom Menschen in viele Weltgegenden verschleppt wurde und den Pilz dorthin mitgenommen hat. Resistente Arten können zudem ein ständiges Pathogenreservoir bilden, von dem aus der Keim jederzeit auf andere Arten überspringen kann. Nichtresistente Amphibienspezies, die der Pilz bereits dezimiert hat, besitzen dann kaum eine Chance, sich wieder zu erholen. Auch Versuche zur Wiederansiedlung sind angesichts solcher Pathogenreservoire häufig zum Scheitern verurteilt.

In manchen Gegenden führte das erstmalige Auftauchen des Pilzes zum raschen Untergang ganzer Amphibienpopulationen, während andere stark dezimiert wurden und sich auch Jahrzehnte später kaum erholt hatten. Wieder andere Spezies infizierten sich zwar, entwickelten aber keiner lei Krankheitssymptome. Beispiele für dieses Ausbreitungsmuster finden sich im mittelamerikanischen Hochland, in den Anden, im Osten Australiens und im westlichen Nordamerika. In einigen tiefer gelegenen Regionen sowie in den Gebirgen Nordostamerikas ist die Amphibienkrankheit zwar ebenfalls präsent, scheint sich jedoch kaum auf die dort lebenden Spezies auszuwirken.

Trotz beträchtlicher Forschungsanstrengungen wissen wir nur sehr wenig darüber, warum sich die Krankheit je nach Art und Lebensraum in so unterschiedlicher Weise manifestiert. *Batrachochytrium dendrobatidis* hat sich als invasive Spezies und Erreger einer neu aufkommenden Infektionskrankheit mittlerweile auf alle Kontinente ausgebreitet. Nur Asien blieb bislang weit gehend verschont – neben der Antarktis, wo keine Amphibien leben. Bis heute kennen wir

Seit den 1970er Jahren registrieren Forscher ein Massensterben zahlreicher Amphibienarten. Das Bild zeigt einige der letzten Gelbbeinigen Gebirgsfrösche *(Rana muscosa)*, die im kalifornischen Kings Canyon National Park gesichtet wurden.

JOEL SARTORE, WWW.JOELSARTORE.COM

Wirkstoff von Antibabypillen lässt Frösche weniger flirten

Hormone in Gewässern beeinflussen das Sexualverhalten von Fröschen. Dies haben Frauke Hoffmann und Werner Kloas vom Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei kürzlich nachgewiesen. Die Wissenschaftler liefern damit eine weitere Erklärung für das weltweite Schrumpfen von Amphibienpopulationen.

Wenn der Afrikanische Krallenfrosch *Xenopus laevis* (Bild) auf Brautschau geht, stößt er Balzrufe mit einem charakteristischen Klicken aus, um Weibchen anzulocken. Hoffmann und Kloas setzten die balzenden Tiere der Substanz Ethinylestradiol aus, einem typischen Wirkstoff von Antibabypillen. Schon bei sehr niedriger Dosierung (millionstel oder milliardstel Gramm pro Liter Umgebungswasser) gaben die Tiere signifikant weniger Rufe und Klicklaute von sich. Solche Konzentrationen kommen Untersuchungen zufolge in Freilandgewässern vor, denn Frauen, die die Pille nehmen, scheiden den Wirkstoff zum Teil unverändert wieder aus, woraufhin er über Abwässer in die Umgebung gelangt.

LEIBNIZ-INSTITUT FÜR GEWÄSSERÖKOLOGIE UND BINNENFISCHEREI (IGB)

Die Versuche zeigten, dass die schwächlichen Flirtversuche jener Männchen, die dem Wirkstoff ausgesetzt gewesen waren, auf die Weibchen deutlich weniger attraktiv wirken. Das macht es wahrscheinlicher, dass die umworbenen Froschdamen die Paarung verweigern. Ausgeschiedene Reststoffe von Antibabypillen haben somit das Potenzial, den Fortpflanzungserfolg von Fröschen zu beeinträchtigen.

Frank Schubert

weder das einstige Verbreitungsgebiet des Pilzes noch seine ursprünglichen Wirtsorganismen.

Das mysteriöse Verschwinden von Amphibienarten rund um den Globus fiel Herpetologen und Wildbiologen erstmals in den 1970er Jahren und dann besonders seit Mitte der 1980er auf. Zunächst hatten die Wissenschaftler keinerlei Erklärung dafür. Erst Ende der 1990er Jahre tat sich ein Team des US-Nationalzoos unter Leitung von Don Nichols mit der Pilzforscherin Joyce Longcore von der University of Maine (USA) zusammen, die sich als eine von wenigen Wissenschaftlern weltweit auf Chytridpilze spezialisiert hatte. Gemeinsam gelang es ihnen, Gattung und Art des unbekannten Erregers zu identifizieren.

Dass der Keim im Stande ist, stabile Populationen und sogar ganze Arten in kürzester Zeit dahinzuraffen – oft innerhalb von Monaten –, überraschte Naturschutzexperten und Epidemiologen. Schließlich herrschte damals die Ansicht vor, derart dramatische Konsequenzen seien nur möglich, wenn eine Wirtspopulation bereits stark reduziert oder anderweitig gefährdet wäre. Hier aber traf es robuste Gruppen.

Verblüffte Experten

Uns Wissenschaftlern und Umweltschützern war das Konzept eines schlagartigen Aussterbens so fremd, dass wir die ganzen 1990er Jahre hindurch auf Symposien darüber debattierten. Rückblickend erscheint das Szenario eines sich rasant ausbreitenden Erregers völlig einleuchtend, da es mit den wenigsten Nebenannahmen auskommt. Doch damals, inmitten des weltweiten Massensterbens, verstrickten wir uns im Wust von Argumenten wie: »Der Artenschwund kann nicht die Folge einer Krankheit sein; Krankheiten können so etwas nicht auslösen.« Ganz zu schweigen davon, dass der endgültige Beweis, nämlich das Pathogen selbst, erst 1999 beschrieben wurde. Wir haben wertvolle Zeit verloren, aber zumindest lenkte die Debatte unsere Aufmerksamkeit auf andere, bis dahin vernachlässigte Amphibienkrankheiten, etwa Ranaviren-Infektionen, was überfällig gewesen war.

Es ist schwer, sich eine Vorstellung von dem Artenrückgang zu machen, den der Chytridpilz bewirkt hat. Ein Beispiel liefert die Gattung der Stummelfußfrösche *(Atelopus)*, die eigentlich zu den Kröten zählen. Bis in die späten 1980er Jahre hinein verzeichnete man in Süd- und Zentralamerika sowie in der Karibik mindestens 97 Arten; einige davon kennen wir nur dank meines ekuadorianischen Kollegen Luis Coloma und seiner hervorragenden Kenntnisse in forensischer Taxonomie. Heute lassen sich noch etwa zehn Arten der Stummelfußfrösche lokalisieren. Auch die Froschgattung *Craugastor* musste furchtbare Verluste hinnehmen: Einst lebten etwa 38 Arten entlang der Fließgewässer in den Gebirgen Zentralamerikas; heute sind davon noch vier oder fünf übrig. Ich selbst sichtete das letzte bekannte Exemplar einer dieser Spezies vor zwölf Jahren im südlichen Mexiko.

Von »gefährdeten Arten« kann man hier nicht mehr sprechen. Vor unseren Augen verschwinden ganze Kladen (Evolutionszweige mit einem gemeinsamen Vorfahren) mit mehreren Arten beinahe vollständig von der Bildfläche. Bislang waren solche Ereignisse nur von Fossilfunden bekannt. Stellen wir uns einmal vor, welche Konsequenzen ein derartiges Massensterben bei anderen Kladen des Tier- und Pflanzenreichs haben könnte – etwa bei einkeimblättrigen Pflanzen wie Mais, Reis und Weizen oder bei den bestäubenden Insekten, bei den Lachsfischen (Salmonidae) oder den Makrelen und Tunfischen (Scombridae). Und was wäre, sollte es Vögel oder gar Säugetiere treffen?

Trotz ihrer meist geringen Körpergröße stellen Amphibien oft einen beträchtlichen Anteil der Biomasse eines Ökosystems, da sie erstaunliche Populationsdichten erreichen können. Welch große ökologische Bedeutung sie haben, ist

jedoch selbst Wissenschaftlern oft nicht klar, weil viele Amphibien verborgen und nachtaktiv leben. Vor diesem Hintergrund sollten wir den Begriff »Artensterben« überdenken. Das völlige Fehlen von lebenden Vertretern einer Spezies – die bisherige Definition – ist kaum jemals zweifelsfrei zu belegen. Zu Recht sind Organisationen wie die Internationale Naturschutzunion IUCN (International Union for Conservation of Nature and Natural Resources) daher sehr vorsichtig damit, eine Spezies als ausgestorben zu bezeichnen. Was wir deshalb brauchen, ist die Kategorie »funktionell ausgestorben«. So können wir den hunderten Amphibienarten Rechnung tragen, die sich in der so genannten Aussterbespirale befinden und nicht mehr die wichtigen Güter und Dienste bereitstellen können, die sie einst zum Ökosystem beitrugen. Zwar sind sie nur »so gut wie ausgestorben«, was unser Gewissen erleichtern mag, aber sie existieren nicht mehr im funktionellen Sinn.

Mit Blick auf das Massensterben der Amphibien kam ich kürzlich in der Fachzeitschrift »Herpetological Review« zu dem Schluss: »Es existiert heute kein natürliches Hochland-Ökosystem mehr in Mesoamerika« – trotz zahlreicher bestens geschützter Naturreservate. Bis jetzt hat mir niemand widersprochen. Ganz im Gegenteil, mein Kollege Larry David Wilson vom Centro Zamorano de Biodiversidad in Honduras hat diese Auffassung noch erweitert und schlägt vor, praktisch alle Publikationen, die auf Feldversuchen gründen, mit dem Hinweis zu versehen: »Achtung: Diese Studie wurde in einem gestörten Ökosystem durchgeführt.« Er meint damit, dass Artenvielfalt und Populationsgrößen der Amphibien sich vielerorts dramatisch verschoben haben und niemand, auch Herpetologen nicht, das angemessen berücksichtigt.

MIT FRDL. GEN. VON BRAD WILSON

Rabbs Fransenzehen-Laubfrosch *(Ecnomiohyla rabborum)* ist eine von vielen Arten, die der globalen Amphibienkrise bereits zum Opfer fielen. Wissenschaftlich beschrieben wurde er 2008 – ein Jahr nachdem das letzte frei lebende Tier gesichtet worden war.

Die Wildnis aus dem Lot gebracht

Die globale Amphibienkrise stellt auch Untersuchungen in »unberührten« Gegenden in Frage, etwa rund um die biologische Forschungsstation La Selva in Costa Rica; ebenso wirkt sie sich auf Evolutionsstudien, taxonomische Übersichtsarbeiten und Bestandsaufnahmen in Ökosystemen aus. Was Letztere betrifft, werden wir wohl nie die voll ausgeprägte biologische Vielfalt mancher Gebiete kennen lernen, die heute noch unerforscht sind, und daher auch nie die Chance bekommen, die Wechselwirkungen jener Ökosysteme in ihrer ganzen Komplexität zu verstehen. Das wurde mir kürzlich klar, als ich gemeinsam mit meinem Kollegen Martin Bustamante von der Päpstlichen Katholischen Universität Ekuadors (Pontificia Universidad Católica del Ecuador) während mehrmonatiger Feldforschung im südlichen Ekuador nur eine Hand voll Amphibienarten ausfindig machen konnte. Zwar entdeckten wir dabei mehrere Spezies, die der Wissenschaft noch unbekannt waren. Doch das Naturreservat im »unberührten« Nebelwald, in dem wir arbeiteten, müsste eigentlich dutzende Amphibienspezies beherbergen. Die Erfahrungen, die ich während meiner Forschungsreise 1989 in Guatemala gemacht habe, sagen mir, dass unsere spärliche Ausbeute nicht einfach nur auf unseren mangelnden Spürsinn oder fehlendes Glück zurückging.

Weder Naturschutzexperten noch Wissenschaftler haben eine zündende Idee, wie die globale Amphibienkrise in den Griff zu bekommen ist. Bis heute steht ein echter Durchbruch bei der Bekämpfung der Chytridiomykose aus. Impfstoffe gegen Pilzkrankheiten gibt es weder für Menschen noch für Nutztiere, und das trotz des hohen wirtschaftlichen Werts, den wir Letzteren zuschreiben. Immerhin werden die Amphibien von den Maßnahmen gegen den Klimawandel profitieren, für die sich Naturschützer heute weltweit einsetzen – schließlich stellt die Veränderung des Klimas eine zusätzliche Bedrohung für sie dar.

Die IUCN hat einen Aktionsplan erstellt, der wichtige Schritte umreißt, um die Amphibienkrise zu überwinden.

MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de

Unsere Themenseite
»Artenvielfalt und Artensterben«finden Sie unter
www.spektrum.de/artenvielfalt

Der Plan sieht mehrere Programme vor, um Lebensräume zu schützen, die Umweltverschmutzung zu reduzieren, den kommerziellen Fang von Amphibien zu kontrollieren, die Folgen des Klimawandels weiter aufzuklären sowie Populationsbeobachtungen und taxonomische Studien zu intensivieren. Zwei weitere Schwerpunkte fokussieren sich auf die Erforschung und Kontrolle von neu aufkommenden Infektionskrankheiten sowie auf die Frage, was man unternehmen kann, um Tierseuchen einzudämmen. Im Auftrag der IUCN überwachen Experten der Amphibienspezialistengruppe (Amphibian Specialist Group, www.amphibians.org) und des Bündnisses für den Fortbestand der Amphibien (Amphibian Survival Alliance) den Zustand von Populationen auf der ganzen Welt und setzen den Aktionsplan um.

Letzte Zuflucht »Arche«

Um nicht untätig zu warten, bis ein Durchbruch bei der Bekämpfung der Seuche gelingt, hat die IUCN die »Amphibienarche« mit aus der Taufe gehoben (www.amphibianark.org). Dieses ehrgeizige Projekt hat die Aufgabe, ein globales Netzwerk von Erhaltungszuchtkolonien für Arten aufzubauen, deren Überleben in der Wildnis nicht länger gewährleistet ist. Das Ziel lautet, diese Arten in menschlicher Obhut vor dem Aussterben zu bewahren. Natürlich wünscht sich niemand eine Zukunft, in der man Amphibien nur noch in den Terrarien von Zoos und anderen Einrichtungen besichtigen kann. Doch für viele Spezies ist dies im Moment die letzte Hoffnung.

Denn an zahlreichen Orten sind die Froschchöre schon verstummt und die Salamander bereits verschwunden. Immer neue Wellen der Pilzerkrankung sind über sie hinweggefegt, bis in die entlegensten Gegenden unseres Planeten, einschließlich der Naturreservate und Nationalparks. Jonathan Campbell von der University of Texas at Arlington (USA) beschreibt, dass in der Reserva del Quetzal in Guatemala mehr als 70 Prozent der Amphibienarten verschwunden sind. Und laut Laren Lips von der University of Maryland (USA) gingen im panamaischen Nationalpark Omar Torrijos 2004/2005 innerhalb weniger Monate mindestens 30 Amphibienarten verloren – 41 Prozent aller dort lebenden Lurchspezies.

Niemals hätte ich erwartet, dass mein Beruf so sehr dem eines Paläontologen ähneln würde. Es gibt Parallelen zwischen der heutigen Tätigkeit eines Amphibientaxonomen und der eines Detektivs, welcher einen Mordfall untersucht. Beide eilen an den Schauplatz einer Katastrophe. Sie mögen zwar in der Lage sein, das Delikt aufzuklären, aber sie können es nicht ungeschehen machen. Lediglich der Umstand, dass die endgültige Auslöschung einer Art kaum zu beweisen ist, liefert noch einen Hoffnungsschimmer. Ich hoffe sogar, dass ich mich in einigen meiner wissenschaftlichen Befunde geirrt habe – eine Haltung, die ich mir als Student nicht hätte träumen lassen.

Wenn wir schon nicht in der Lage sind, die globale Amphibienkrise wirksam einzudämmen, sollten wir wenigstens versuchen, dies durch verstärkte Bemühungen in den Bereichen wettzumachen, in denen wir etwas ausrichten können. Da wäre beispielsweise die Verminderung der Kohlendioxidemissionen, mit der wir zumindest die verbleibenden Habitate vor unkontrollierbaren Veränderungen bewahren könnten. Außerdem brauchen wir gute Ideen und finanzielle Mittel für neue Vorhaben der Pathogenforschung, um neu aufkommende Infektionskrankheiten besser vorhersagen und kontrollieren zu können. Was wir hier lernen, wird uns nicht nur beim Eindämmen der Amphibienkrise helfen. Und es gilt, weiter Ausschau nach verschollenen Arten zu halten, unsere Studien zur Artenvielfalt fortzuführen und uns nicht lähmen zu lassen von den häufig niederschmetternden Resultaten.

Vor allem aber sollten wir die Lektionen beherzigen, die unzählige tote Amphibien uns lehren. Ich stelle mit einer gewissen Befriedigung fest, dass unsere Kollegen in der Fledermausforschung keine zehn Jahre mit der Diskussion verschwendeten, ob der Pilz, der das Weißnasen-Syndrom hervorruft, möglicherweise ganze Tierkolonien in einer Saison vernichten könne. Die Forscher gingen schlicht davon aus, dass dies möglich ist, und reagierten schnell. Die Amphibien haben uns wachgerüttelt, und wir sollten es ihnen danken – schließlich zahlten sie einen hohen Preis dafür.

DER AUTOR

Joseph R. Mendelson III arbeitet in der herpetologischen Abteilung am Zoo von Atlanta sowie an der School of Biology des Georgia Institute of Technology (Atlanta, USA).

QUELLEN

Mendelsohn, J. R. III et al.: Policy Forum: Confronting Amphibian Declines and Extinctions. In: Science 313, S. 48, 2006

Mendelson, J. R. III, Donnelly, R.: The Crisis of Global Amphibian Declines: Causes, Consequences, and Solutions. Network for Conservation Educators and Practitioners. American Museum of Natural History, New York. **http://research.amnh.org/biodiversity/ncep**

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1149653**

© American Scientist
www.americanscientist.org

NEU

DAS BAUMEISTERSPIEL KLASSIK

Unendliche Vielfalt

Format 12,5 x 12,5 cm, blaue Steine mit grauer Platte aus Recyclingkunststoff, Logika Spiele

Bestell-Nr. 3616 € 16,–

Das Baumeisterspiel lässt sich in seiner handlichen und ansprechenden Aufmachung ein ganzes Leben in immer wieder neuen Variationen spielen. Acht verschieden gestaltete Bausteine, die jeder für sich aus mehreren Einzelwürfeln bestehen, werden auf einer Grundplatte zu den unterschiedlichsten Formen zusammengebaut. Mit seiner unerschöpflichen Vielfalt weckt es den Spielspaß und schult sozusagen spielerisch Gedächtnis, Konzentration, Geduld, Intelligenz und erst recht räumliches Vorstellungsvermögen, Fantasie, Intuition, laterales Denken. Für 1 Spieler.

WASSERRAKETE SHOOTINGER

Raketenbausatz inklusive Startrampe

Höhe: ca. 52 cm, Durchmesser: ca. 9 cm, Academy Europe

Bestell-Nr. 3467

€ 39,90

Flughöhe bis zu 100 Meter nur mit Wasser und Druckluft! Der Bausatz enthält zwei PET-Flaschen, die zu einer formschönen Rakete kombiniert werden können. Die stabile Raketenspitze aus Gummi aufgesetzt, die Leitflossen ans Heck montiert, die Aufkleber angebracht, die stabile Startplattform montiert, und schon kann es los gehen! Alles in allem braucht man vielleicht eine Stunde Vorbereitung und eine Luftpumpe (nicht im Bausatz enthalten).

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich

STIRLINGMOTOR WIRO 1.0 BAUSATZ

Basis-Set

2011, m. ausf. bebilderter Bauanleitung m. Infos zu Historie u. Funktion, eduwerk

Bestell-Nr. 3272 € 32,90

Ein Motor mit Charakter! Das Modell besticht durch hervorragende Laufeigenschaften schon bei geringer Energiezufuhr. Es kann mit einer Spiritusflamme beheizt werden, aber ebenso mit einem Teelicht oder mit gebündelter Sonnenstrahlung (Parabolspiegel oder Fresnel-Linse). Der Verdränger'kolben' besteht aus Kugeln, deren Anzahl von 1 bis 7 verändert werden kann. Durch die vielen Variationen ergeben sich sehr unterschiedliche Lauf- und Bewegungseigenschaften, die einen Unterhaltungswert haben. Der Bausatz ist auch sehr gut für Schüler ab 12 Jahren geeignet. Aufbauzeit: ca. 60 Minuten.

Besuchen Sie uns im Internet unter:
www.science-shop.de

NEU

DIE KNOTENBOX

50 Knoten-Klassiker für Freizeit, Sport und Alltag

Mit 2 Schnüren zum Üben in Metallbox, moses

Bestell-Nr. 3617 € 12,95

Warum hat es der Seemann so gut? Richtig – er kann in jeder Lebenslage den richtigen Knoten knüpfen. Aber wir Landratten müssen nicht verzagen: Mit der Knotenbox lernen wir 50 praktische und bewährte Knoten mit Hilfe der 50 handlichen Karten und der beiliegenden 2 Schnüre. Mit anschaulichen Schritt-für-Schritt-Abbildungen und wissenswerten Sachinformationen rund um Entstehung, Gebrauch und Anwendung der Knoten.

DAMPFMASCHINE »MINI BEAM« – FERTIGMODELL

Länge: 106 mm, Breite: 49 mm, Höhe: 73 mm (über Schornstein), Kolbendurchmesser: 7 mm, Hub: 7 mm, Steuerung: Schiebersteuerung, doppelseitig wirkend, Gewicht: 96 g, Laufzeit: ca. 5 Min. mit einer Wasserfüllung, Hielscher

Bestell-Nr. 3535 € 149,50

Die ersten funktionsfähigen Dampfmaschinen, die um 1750 zum industriellen Einsatz kamen, waren Beam=Balken=Balance, alles Maschinen mit einem auf einer Mittelsäule liegenden Balken: sowohl die atmosphärische Dampfmaschine von Thomas Newcomen von 1712 als auch die Niederdruckmaschine von James Watt um 1769. Unser Modell, die kleinste, doppelseitig wirkende Beam-Dampfmaschine, wurde von Lutz Hielscher entwickelt. Mit Abdampfkondensator und aus Edelstahl, Messing und Aluminium.

Ebenfalls lieferbar als Bausatz:

DAMPFMASCHINE »MINI BEAM« – BAUSATZ

Bestell-Nr. 3536 € 136,50

Ulrich E. Stempel

DAS SOLARBLOCK-HAUS – BAUSATZ

145 Teile aus Holz, Solareinheit mit Motor, Propeller-Dreiflügler, Kunststoffschale zum Gras sähen, 1 Tüte Grassamen, Kokosnuss-Substrat, ab 6 Jahren, Inprosolar

Bestell-Nr. 3534 € 68,–

Mit diesem Bausatz können Kinder spielerisch die Wind-und Solartechnik kennen lernen, denn am Blockhaus befindet sich ein Windgenerator. Im Vorgarten kann Rasen ausgesäht und beim Wachsen beobachtet werden. Wenn man das Haus nicht fest verleimt, kann es immer wieder neu auf- und abgebaut werden. Die 145 Stück Holzbalken und Kleinteile stammen aus dem traditionsreichen französischen Jura. Das Holz wird ausschließlich aus wiederbeforsteten Wäldern geschlagen, langsam getrocknet und umweltfreundlich verarbeitet.

NEU

BRESSER VISIOMAR MICROSET 40X-1024X

Mikroskop-Set mit USB-Anschluss

Kunststoffkoffer, Staubschutzhülle, 230-V-Netzteil (5,5 V / 200 mA), Präparatebox mit 5 Dauerpräparaten; Objektträgern und Deckgläschen, Präparierbesteck, Garnelenbrutanlage, MikrOkular II mit Bildbearbeitungssoftware, Meade

Bestell-Nr. 3618 € 89,–

Hochwertiges Schülermikroskop mit Barlow-Linsen-Zoom-System und PC-Okular

Ausgestattet mit einer Barlow-Linse, die die Vergrößerung des Mikroskops bis zu 1,6-fach steigert, ein MikrOkular I (PC-Okular mit 640 x 480 Pixel Auflösung), Ulead-Photo-Explorer-Bildbearbeitungssoftware, USB-Verbindungskabel, 2 optische Okulare und Netzadapter sowie weiterem nützlichen Starter-Zubehör wie: 5 Dauerpräparate, 10 Objektträger, 20 Deckgläser und Staubschutzhülle. Beobachtungsobjekte: Kleinorganismen, Insekten, Pflanzen, kleinere Mineralien.

Bestellen Sie direkt: **+49 6221 9126-841** **@ info@science-shop.de**

Die Wissensbecher aus hochwertigem Porzellan sind ein schönes und nützliches Geschenk!

Höhe: 105 mm; Inhalt: 460 ml, spülmaschinengeeignet, Könitz Porzellan

WISSENSBECHER MATHEMATIK
Bestell-Nr. 3430 € 9,95

WISSENSBECHER PHYSIK
Bestell-Nr. 3431 € 9,95

WISSENSBECHER CHEMIE
Bestell-Nr. 3432 € 9,95

VERSCHÄTZT NOCH MAL!

Sinnloses Wissen, nutzlose Fakten und verrückte Fragen!

2012, 106 Fragekarten, ab 12 Jahren, Kylskapspoesie

Bestell-Nr. 3566

€ 21,95

Wie viele Haare hat eine Augenbraue? Und wie lange wäre der Bart eines Mannes, wenn er sich zeit seines Lebens nicht rasieren würde? Wie nah liegen Sie mit Ihrer Einschätzung bei einer korrekten Antwort? – Liegen Sie dichter dran als Ihre Freunde? Hier ist eine Menge an gesundem Menschenverstand und Kreativität gefordert. Seien Sie gefasst auf jede Menge absurde Schätzungen, von Ihnen selbst und Ihren Freunden! Das perfekte Spiel für jeden Fan von sinnlosem Wissen und schrägen Fakten, gewürzt mit einer ordentlichen Prise Humor.

Für Bestellungen außerhalb Deutschlands und Österreichs berechnen wir € 3,50 Versandkosten. Alle Preise inkl. Umsatzsteuer. Preise unter Vorbehalt. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH

ANDY POTTS LIMITED

Alan Turing (1912–1954)

Die wissenschaftlichen Errungenschaften, die den Namen Turing tragen, zeichnen das Bild eines zweifellos genialen, aber weltfernen Schreibtischgelehrten. Die Turing-Maschine ist ein theoretisches Konzept von unschätzbarer Bedeutung (siehe den Beitrag von George Dyson ab S. 81); aber niemand könnte ernsthaft behaupten, eine Turing-Maschine sei zu irgendetwas nütze – wenn sie denn je gebaut würde.

Auch den Turing-Test hatte sein Erfinder nicht entwickelt, um etwas zu testen. Stattdessen sollte dieses Gedankenexperiment klären, wie wir dazu kommen, unseren Mitmenschen eine Eigenschaft zuzuschreiben, die wir von uns selbst nur durch Introspektion kennen: Bewusstsein. Ein Gutachter sitzt vor einem Fernschreibgerät – heute würde man sagen: in einem Chat-Forum im Internet – und tauscht mit einem Unbekannten am anderen Ende der Leitung Fragen und Antworten aus. Angenommen, er kommt nach einem längeren Frage-Antwort-Spiel zu dem Ergebnis, sein Partner sei ein Mensch, es ist aber in Wirklichkeit eine Maschine: Müsste man dieser Maschine dann Bewusstsein, Intelligenz oder ähnliche Qualitäten zuschreiben, die bislang in unserer Vorstellung den Menschen vorbehalten sind?

Schließlich ruft sein Suizid im Alter von 41 Jahren die Erinnerung an seinen großen Kollegen Kurt Gödel (1906–1978) wach, dessen Arbeiten er fortführte (Spektrum der Wissenschaft 9/1999, S. 74). Gödel starb letztlich an Unterernährung, weil er die Rigorosität seines wissenschaftlichen Denkens auf das tägliche Leben anwandte – wo sie verfehlt war.

Ein genauerer Blick korrigiert dieses Bild in vielen Punkten. Turings höchst praktische Beiträge zur Entwicklung des modernen Computers sind erst nach Aufhebung der militärischen Geheimhaltung ans Licht gekommen. Die universelle Maschine, eine Weiterentwicklung der Turing-Maschine, erweist sich als geeignetes Modell für den Kode des Lebens (siehe den Beitrag von Sydney Brenner ab S. 84). Eine »Nebenbeschäftigung« Turings legte die Grundlage für eine ganze Richtung der Entwicklungsbiologie (siehe den Beitrag von John Reinitz ab S. 85).

Auch die näheren Umstände seines Todes lassen nicht auf Weltfremdheit schließen. Zweifellos hat seine Verurteilung wegen homosexueller Handlungen ihm einen schweren Schlag versetzt. Aber offensichtlich hatte er sich davon zum Zeitpunkt seines Todes erholt. Dennoch gilt nach wie vor einer der größten Söhne des Landes offiziell als Krimineller, womit sich sein Biograf Andrew Hodges auseinandersetzt (siehe seinen Beitrag ab S. 87).

AUF EINEN BLICK

BIOGRAFIE EINES GENIES

1 **Vor 100 Jahren,** am 23. Juni 1912, wird Alan Mathison Turing in London geboren.

2 In seiner Arbeit **»On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem«** setzt er 1936 an die Stelle von Kurt Gödels mathematischem Formalismus eine einfache fiktive Maschine. Durch Nachdenken über diese **»Turing-Maschine«** gewinnt er wesentliche Erkenntnisse zum Problem der Berechenbarkeit.

3 Im Zweiten Weltkrieg ist er maßgeblich an der Entschlüsselung der Nachrichten beteiligt, welche die Deutschen mit Hilfe der **Chiffriermaschine Enigma** vor ihren Gegnern geheim zu halten versuchen.

4 Nach dem Krieg arbeitet er an der Entwicklung von Software für den frühen britischen Computer Manchester Mark I. Mit dem **Turing-Test** (1950), im Wesentlichen ein Mittel zur Klärung von Begriffen wie Bewusstsein, beeinflusst er maßgeblich die im Entstehen begriffene Forschungsrichtung Künstliche Intelligenz.

5 Mit »The Chemical Basis of Morphogenesis« von 1952 legt Turing den Grundstein für ein Konzept der **Entwicklungsbiologie**, das erst Jahrzehnte später wieder aufgegriffen wird. Im selben Jahr wird er wegen homosexueller Handlungen zu einer Hormonbehandlung verurteilt. Am 7. Juni 1954 nimmt sich Turing, allem Anschein nach mit einem durch Zyanid vergifteten Apfel, das Leben.

Der geistige Vater des Computers

Alan Turing gelang der Brückenschlag zwischen Logik und Maschinen. Damit legte er die Basis für alle heutigen Computer.

VON GEORGE DYSON

Wie die Bibel lässt sich die Geschichte der Digitalrechner in ein Altes und ein Neues Testament unterteilen. Die Propheten des ersteren, angeführt von Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716), lieferten um 1670 die logischen Grundlagen; die des Neuen Testaments, mit John von Neumann (1903–1957) an der Spitze, bauten ab 1940 die Maschinen. Alan Turing, geboren am 23. Juni 1912, steht zwischen beiden Lagern. Seine Abhandlung »Über berechenbare Zahlen, mit einer Anwendung auf das Entscheidungsproblem«, die er 1936 als Fellow des King's College an der University of Cambridge (England) verfasste und kurz nach seinem Wechsel als Doktorand an die Princeton University (New Jersey) im Oktober 1936 veröffentlichte, lieferte die Grundlagen für die Übertragung mathematischer Logik auf Maschinen.

Turing hatte sich zum Ziel gesetzt, das 1928 von dem deutschen Mathematiker David Hilbert (1862–1943) formulierte Entscheidungsproblem zu lösen – das heißt die Frage zu beantworten, ob sich die Gültigkeit beliebiger logischer Aussagen mit einem mechanischen Verfahren in einer endlichen Zahl von Schritten beweisen lässt. Dazu wählte er die einzige Art von »Computer«, die es in den 1930er Jahren gab: einen mit Papier, Bleistift und Instruktionen versehenen Menschen. Dieses Rechnermodell reduzierte er formal, indem er alle Spuren von Intelligenz tilgte; zurück blieb nur die Fähigkeit, Befehle zu befolgen und ein begrenztes Sortiment an Symbolen auf einem beliebig langen Papierstreifen zu lesen und zu schreiben.

Das Ergebnis war die so genannte Turing-Maschine: eine mathematische Blackbox, die vorgegebene Instruktionen befolgt. Diese stehen als kodierte Symbole in aneinandergereihten Feldern auf dem Papierstreifen, der zugleich die Eingabedaten enthält und die Ausgabedaten aufnimmt. Die jeweils auszuführende Anweisung hängt von dem gerade gelesenen Symbol und dem momentanen internen »Geisteszustand« der Maschine ab. Sie besteht darin, ein Symbol auf dem aktuellen Feld zu löschen oder zu schreiben, den gegenwärtigen Geisteszustand beizubehalten oder zu ändern und ein Feld nach links oder rechts weiterzurücken oder – nach dem Ende der Berechnung – anzuhalten. Für eine Turing-Maschine existiert Zeit nicht als Kontinuum, sondern als Folge von Arbeitsschritten.

Komplexe Symbole lassen sich durch eine Serie einfacherer Zeichen darstellen. Letztlich genügen zwei davon – zum Beispiel eine Eins und eine Null oder ein Loch und dessen Fehlen in einem Papierstreifen. Diese kleinste Einheit der Information ist das »Bit« (von englisch: binary digit, Binärziffer). Solche Bits können räumlich nebeneinander angeordnet werden und über lange Zeit unverändert bleiben. Dann dienen sie quasi als Gedächtnis. Werden sie zeitlich nacheinander an einen anderen Ort übermittelt, fungieren sie als Nachricht.

Als Zweites wies Turing nach, dass eine solche Maschine theoretisch in der Lage ist, »jede berechenbare Sequenz zu berechnen«. Als »universelle Rechenmaschine« kann sie beliebige andere Maschinen nachahmen, indem sie eine passend kodierte Beschreibung von deren Arbeitsweise ausführt. Damit schuf Turing das Grundkonzept für die heutige Software.

Schließlich löste der geniale Mathematiker Hilberts Rätsel, indem er fragte: Gibt es eine universelle Rechenmaschine, die für jeden beliebigen anderen Automaten, dessen Arbeitsweise sie nachahmt, in einer endlichen Zahl von Schritten herausfindet, ob er mit Sicherheit irgendwann anhält? Turing konnte zeigen, dass das nicht der Fall ist. Damit hieß die Antwort auf das Entscheidungsproblem »Nein«. »Man kann eine Maschine bauen, die alles, was machbar ist, tun kann«, resümierte von Neumann Turings Beweis bei einer Vorlesung 1949, »aber man kann keine Maschine bauen, die einem sagt, ob etwas machbar ist.«

Kodeknacken für die Alliierten

Um die Grenzen deterministischer Automaten zu überwinden, entwarf Turing später seine nichtdeterministischen »Orakel«-Maschinen, die normalerweise Schritt für Schritt vorgehen, aber manchmal auch unvorhersehbare Sprünge machen, indem sie eine Art Orakel befragen. Die weltpolitischen Ereignisse lenkten das Interesse des Computerpioniers zunächst allerdings in eine andere Richtung. Nur ein Jahr, nachdem er seine Dissertation beendet hatte und im Juli 1938 nach England zurückgekehrt war, brach der Zweite Weltkrieg aus. Dadurch waren in Militärkreisen auf einmal Experten in Kryptografie gefragt. Da Turing sich schon eingehend mit dem Gebiet beschäftigt hatte, erhielt er eine Stelle bei der Government Code & Cypher School in Bletchley Park. Dort entschlüsselte er zusammen mit seinem Mentor, dem Topologen Maxwell (»Max«) Newman

(1897–1984), und anderen Kollegen feindlichen Militärkode – unter anderem auch Nachrichten, die mit der deutschen Enigma verschlüsselt waren. Diese legendäre Chiffriermaschine galt mit ihren rund 10^{20} möglichen Einstellungen als praktisch nicht zu knacken.

Als Hilfsmittel entwickelte das Bletchley-Park-Team zunächst einfache elektromechanische Maschinen, so genannte Bomben. Jede davon konnte gleichzeitig 36 vermutete Enigma-Einstellungen nachbilden. 1943 bauten die Wissenschaftler gemeinsam mit dem Ingenieur Thomas Flowers von der Forschungsabteilung der Post im Londoner Stadtteil Dollis Hill einen Automaten namens Colossus – den ersten komplexen elektronischen Computer. Dank eines internen Datenspeichers aus 1500 Elektronenröhren war er programmierbar. Damit konnte er Daten auf Lochstreifen nach Mustern durchsuchen, die bei der Entschlüsselung halfen.

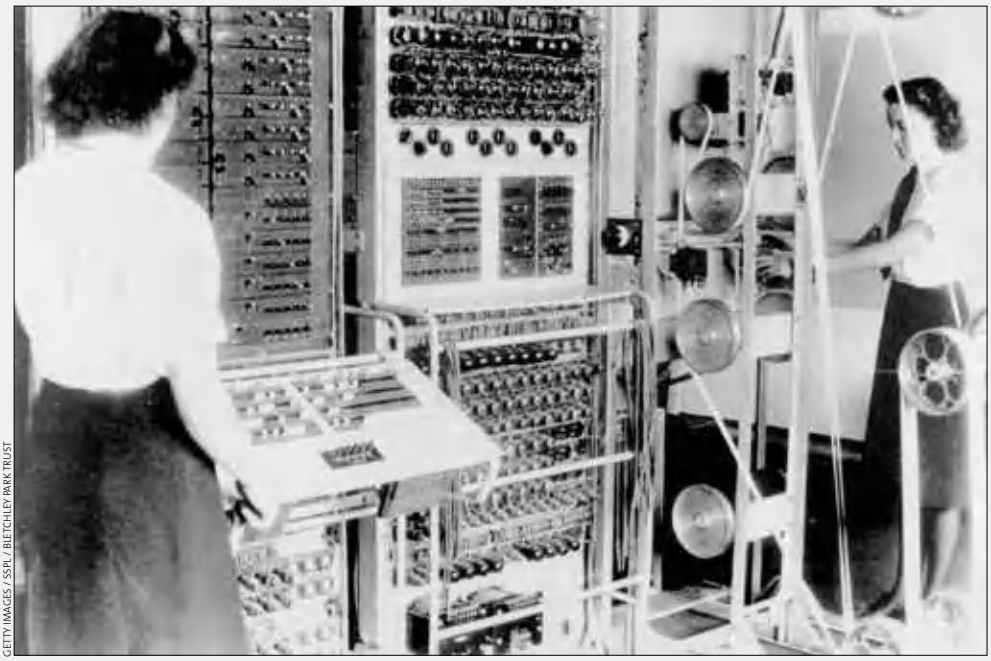
Colossus wurde rasch verbessert. Als Nachfolgemodell entstand Anfang 1944 ein 2400-Röhren-Rechner, der nicht nur den Kriegsverlauf beeinflusste, sondern auch die Entwicklung moderner Computer vorantrieb, obwohl die Details gemäß den britischen Geheimdienstbestimmungen 30 Jahre lang unter Verschluss blieben.

Nach Kriegsende verlagerte sich das Interesse von der Kryptoanalyse zur Entwicklung von Kernwaffen. Auch dafür wurden jedoch leistungsfähige Rechner benötigt. Nun übernahmen die Vereinigten Staaten die Führung, die alle Informationen über ihren Kriegscomputer ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer) schon 1946 freigaben.

John von Neumann machte sich am Institute for Advanced Study in Princeton daran, eine elektronische Version von Turings universeller Rechenmaschine zu entwickeln. Dazu erhielt er Fördermittel der US-Armee, des Office of Naval Research sowie der US-Atomenergie-Kommission. Ihm schwebte ein Rechner mit einem Speicher vor, auf den mit Lichtgeschwindigkeit zugegriffen werden kann, und er beschloss, ihn selbst zu konstruieren. Da die US-Regierung wissen wollte, ob der Bau einer Wasserstoffbombe möglich ist, stellte von Neumann einen Computer mit fünf Kilobyte Speicher in Aussicht, der die dafür nötigen hydrodynamischen Berechnungen durchführen könne. Das Design dieser Maschine wurde veröffentlicht, so dass sie jeder kostenfrei nachbauen konnte – woraus IBM weidlich Kapital schlug.

»Wörter, die die Befehle kodieren, werden im Speicher genauso behandelt wie Zahlen«, kündigte von Neumann auf dem ersten Projekt-Meeting am 12. November 1945 an. Diese Gleichbehandlung von Daten und Anweisungen war das grundlegende Konzept von Turing. Die meisten heutigen Computer sind von ihrer logischen Architektur her direkte Nachfahren jenes Rechners namens EDVAC, der damals im Nebengebäude einer Farm in New Jersey aus nicht mehr benötigtem Kriegsmaterial entstand.

Turing und von Neumann waren sich erstmals 1935 in Cambridge begegnet und forschten danach zwei Jahre gemeinsam in Princeton, wo Max Newman für sechs Monate zu ihnen stieß. Wie eng beide in der Kriegszeit zusammenarbeiteten, ist nicht bekannt – wohl aber, dass Turing zwischen November 1942 und März 1943 in den USA war und von Neumann von Februar bis Juli 1943 in England. Während des Kriegs leisteten britische Physiker, die Verbindung zu Turing hatten, wichtige Beiträge zum Atombombenprojekt in Los Alamos (New Mexico). Umgekehrt trugen US-Kryptoanalytiker, die in Kontakt mit von Neumann standen, zu den Arbeiten in Bletchley Park bei. Turing, von Neumann und Newman konnten sich ihre Ideen nicht offen in Schriftform mitteilen, haben aber während des Kriegs und danach sicher mehrfach miteinander darüber gesprochen.



GETTY IMAGES / SSPL / BLETCHLEY PARK TRUST

Auf Basis der Algorithmen von Alan Turing half der Rechner Colossus den Engländern im Zweiten Weltkrieg, deutschen Geheimtext zu dechiffrieren.

Turings Modell war eindimensional – eine Zeichenfolge auf einem Papierstreifen. Von Neumann stellte sich seinen universellen Computer zweidimensional vor, als sehr speziellen zellulären Automaten (Spektrum der Wissenschaft 5/2012, S. 84). An die Stelle der Lochstreifen traten später Disketten oder Festplatten, auf denen die Daten zweidimensional angeordnet sind. Mit dem Internet – einer Vielzahl von Turing-Maschinen mit gleichzeitigem Zugriff auf gemeinsame Speicherinhalte – ist inzwischen eine dritte Dimension hinzugekommen. Dennoch hat sich die Arbeitsweise von Computern seit 1946 im Prinzip nicht grundlegend verändert.

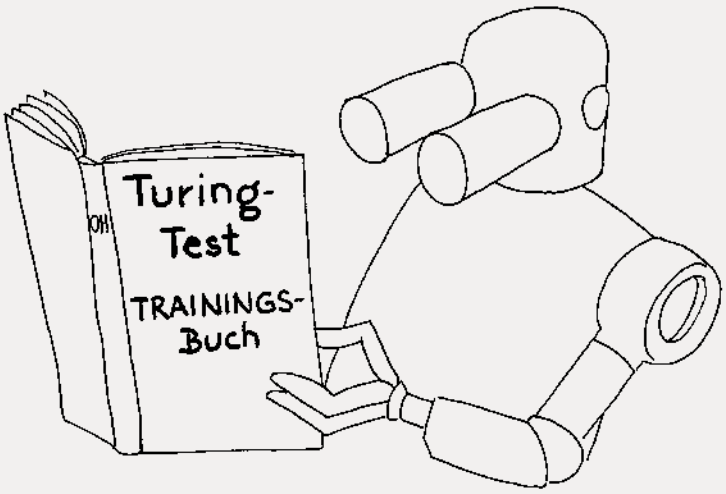
Maschinen, die aus Fehlern lernen

Sowohl Turing als auch von Neumann waren sich der Verarbeitungsfehler ihrer Maschinen bewusst. In den ersten nicht sehr umfangreichen Computerkodes ließ sich noch jeder »Bug« aufspüren. Aber die Hardware arbeitete nicht zuverlässig, was zu inkonsistenten Ergebnissen führte. Seitdem hat sich das Problem umgekehrt. Beide Computerpioniere wussten, dass die Biologie auf statistischen, fehlertoleranten Methoden der Informationsverarbeitung basiert – etwa im Gehirn, wo Informationen durch die Anzahl der Nervenimpulse pro Sekunde kodiert werden. Ihrer Überzeugung nach blieb der Technik keine Wahl, als denselben Weg einzuschlagen. »Müsste jeder Fehler gefunden, verstanden und korrigiert werden, könnte ein System von der Komplexität lebender Organismen nicht eine Millisekunde lang funktionieren«, erklärte von Neumann.

»Wenn eine Maschine absolut fehlerfrei arbeiten soll, kann sie nicht zugleich intelligent sein«, notierte Turing 1947. Diese Einsicht setzte er auch in die Praxis um, als er im folgenden Jahr zu Newmans Forscherteam an der Unversity of Manchester (England) stieß und dort an der Entwicklung von »Manchester Mark I« arbeitete. Dabei handelte es sich um den Prototyp von Ferranti Mark I, dem ersten kommerziellen Digitalcomputer mit der Fähigkeit, Programme zu speichern. Turing erweiterte ihn um einen Zufallszahlengenerator, der es dem Rechner ermöglichte, gelegentlich blind zu raten und aus seinen Fehlern zu lernen.

Turings deterministische Universal-Maschine sollte ihn berühmt machen, doch seine nichtdeterministischen Orakel-Maschinen kommen echter Intelligenz näher; denn nach Art der menschlichen Intuition überbrücken sie die Lücken zwischen logischen Ableitungen. Ihr Prinzip wird heute in großem Umfang genutzt. So arbeitet eine Internetsuchmaschine grundsätzlich deterministisch. Doch wenn jemand auf einen Link klickt, ist das ein unvorhersehbares Zufallsereignis. Die Suchmaschine nutzt diese nichtdeterministische Information, um ihre interne Rangliste zu optimieren und so ihre künftige Treffergenauigkeit zu verbessern.

Turing interessierte sich auch dafür, was Molekülen die Fähigkeit zur Selbstorganisation verleiht. Und er wollte wissen, ob Maschinen denken können. Von Neumann beschäftigte sich mit der Frage, wie das Gehirn funktioniert und ob Maschinen es reproduzieren können. Als Turing 1954 im Alter von nur 41 Jahren starb, war seine Theorie der Morphogenese noch unfertig. Der 53-jährige von Neumann wiederum hinterließ bei seinem Tod drei Jahre später eine unvollständige Theorie der Selbstreproduktion – die inspiriert war von der Fähigkeit der Turing-Maschine, sich selbst zu kopieren. Man kann nur spekulieren, ob Turings und von Neumanns Ideen miteinander verschmolzen wären, wenn beide länger gelebt hätten. Ihr Tod fiel just in die Zeit, als Biologen die Mechanismen entdeckten, die der Übersetzung einer DNA-Sequenz in eine Proteinstruktur zu Grunde liegen. ~



DER AUTOR

George Dyson ist Wissenschaftshistoriker und Autor der Bücher »Turing's Cathedral« und »Darwin im Reich der Maschinen«.

QUELLEN

Hopcroft, J. E.: Turing-Maschinen. In: Spektrum der Wissenschaft 7/1984, S. 34–49

von Neumann, J.: Theory of Self-Reproducing Automata. Hg. von A. W. Burks, University of Illinois Press, 1966

Turing, A. M.: On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem. In: Proceedings of the London Mathematical Society, Second Series 42, S. 230–265, 1936

Turing, A. M.: Systems of Logic Defined by Ordinals. In: Proceedings of the London Mathematical Society, Second Series 45, S. 161–228, 1939

WEBLINKS

http://doctor-media.blogspot.de/2009/11/alan-turing.html
Erläuterung der Funktionsweise von Turing-Maschinen

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1149655**

© Nature Publishing Group

www.nature.com
Nature 482, S. 459–460, 23. Februar 2012

Kode des Lebens

Turing-Maschinen und Zellen haben überraschend vieles gemeinsam!

VON SYDNEY BRENNER

In den Werken Turings findet sich vieles, was der biologischen Forschung einen Ausweg aus ihrer gegenwärtigen Krise – Überfluss an Daten und Mangel an ordnenden Theorien – weisen könnte.

Das gilt nicht vorrangig für die Arbeit »Computing Machinery and Intelligence« aus dem Jahr 1950. In ihr beschreibt Turing erstmalig ein Frage-Antwort-Spiel, mit dem ein externer Befrager versucht, herauszufinden, ob sein Gegenüber am anderen Ende der Fernschreibleitung eine Rechenmaschine oder ein Mensch ist – was in der Folge als »Turing-Test« berühmt wurde. Aber dieses Gedankenexperiment ist in erster Linie von philosophischer Bedeutung. Selbst wenn eine Maschine in der Zukunft den Turing-Test besteht, beweist das weder, dass sie über Intelligenz verfügt, noch können wir aus ihrer Funktionsweise auf die des menschlichen Gehirns schließen. Dafür benötigen wir vielmehr eine eigene Theorie.

Heute wissen wir, dass Turings Werk »The Chemical Basis of Morphogenesis« von 1952 wesentliche Ideen zur biologischen Musterbildung vorweggenommen hat. Die Biologen taten sich allerdings zunächst schwer mit dem Konzept, weil sie Turings »Morphogene« so eng, wie sie diese interpretierten, in lebenden Organismen nicht wiederfinden konnten. Erst mit der Rechenleistung späterer Computer und in der Abwandlung durch andere kamen Turings Ideen zur vollen Blüte (siehe den folgenden Beitrag von John Reinitz).

ANDY POTTS LIMITED

Die wohl interessanteste Verbindung zur Biologie findet sich in der Arbeit »On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem«, die der erst 24-jährige Turing 1936 veröffentlichte. Eine Erweiterung der abstrakten Turing-Maschine, deren gedachtes Magnetband anfangs die Daten und das auf sie anzuwendende Programm, am Ende das Ergebnis der Berechnung enthält (siehe den vorstehenden Beitrag von George Dyson), ist die ebenfalls von Turing definierte »universelle Maschine«, die jede Berechnung ausführen kann, die sich als Befehlsfolge auf einem solchen Band notieren lässt. Das ist der Ursprung des digitalen Computers.

Die Zelle als sich selbst vermehrende Maschine

In den 1940er Jahren führte der Mathematiker und Ingenieur John von Neumann (1903–1957) Turings Ideen fort. Er konzipierte einen »universellen Konstrukteur« (»Universal Constructor«), der im Stande ist, nach einer formalisierten, auf einem Band notierten Beschreibung jede beliebige Maschine zusammenzusetzen – einschließlich sich selbst. Um diese Aufgabe vollständig auszuführen, muss der universelle Konstrukteur seine eigene Beschreibung kopieren und sie dann seinem Nachkommen eingeben. Von Neumann bemerkte, dass die Maschine jeden Kopierfehler als »Mutation« ihren Nachkommen vererben würde (Spektrum der Wissenschaft 5/2012, S. 84).

Die wohl besten Beispiele für Turings und von Neumanns Maschinen finden sich in der Biologie. Nirgends sonst gibt es so komplexe Systeme, in denen jeder Organismus eine interne Beschreibung seiner selbst enthält. Das Genom ist eine Repräsentation des Organismus in Form einer Symbolfolge, vergleichbar der Konstruktionsbeschreibung auf dem Band des »universellem Konstrukteurs«. Diese Symbolfolge ist ein grundlegendes Merkmal der lebenden Welt und muss den Kern der biologischen Theorie bilden.

Turing starb 1954, ein Jahr, nachdem James Watson und Francis Crick die Doppelhelix-Struktur der DNA entdeckten, aber noch vor der darauf folgenden Revolution in der Biologie. Weder seine noch von Neumanns Arbeiten hatten direkte Auswirkungen auf die Molekularbiologie, aber sie ermöglichen es, unsere Gedanken über Maschinen – natürliche wie künstliche – zu ordnen.

Turing erfand den Computer mit gespeichertem Programm, und von Neumann zeigte, dass der universelle Kon-

strukteur und seine Konstruktionsbeschreibung verschiedene Dinge sind. Das ist nicht selbstverständlich. Der Physiker Erwin Schrödinger (1887–1961) bezeichnete in seinem 1944 erschienenen Buch »What is Life?« (deutsch »Was ist Leben?«, 1951) die Chromosomen als »zugleich Gesetzbuch und ausübende Gewalt, Plan des Architekten und Handwerker des Baumeisters«. Das ist falsch. Das Genom enthält nur eine Beschreibung der ausführenden Funktion, nicht die Funktion selbst. Unser Problem besteht heute darin, den Konstrukteursanteil der Maschinerie zu verstehen, und dafür ist das richtige Abstraktionsnivau die Zelle.

Die Biologen stellen nur drei Fragen an einen lebenden Organismus: Wie funktioniert er? Wie ist er gebaut? Und wie kam es dazu? Diese Fragen sind Gegenstand der klassischen biologischen Gebiete Physiologie, Embryologie und Evolutionsforschung. Und den Kern von alledem bilden die Bänder mit den Beschreibungen für den Bau dieser speziellen Turing-Maschinen.

© Nature Publishing Group
www.nature.com
Nature 482, S. 461, 23. Februar 2012

DER AUTOR

Sydney Brenner, geboren 1927 in Germiston (Südafrika), wies am Fadenwurm *Caenorhabditis elegans* nach, dass wichtige Schritte in der Embryonalentwicklung genetisch gesteuert werden (Nobelpreis 2002). Heute ist er Senior Fellow am Forschungszentrum Janelia Farm des Howard Hughes Medical Institute in Ashburn (Virginia).

QUELLEN

Brenner, S.: Sequences and Consequences. In: Philosophical Transactions of the Royal Society B 365, S. 207–212, 2010
Turing, A. M.: The Chemical Basis of Morphogenesis. In: Philosophical Transactions of the Royal Society of London B 237, S. 37–72, 1952
Turing, A. M.: Computing Machinery and Intelligence. In: Mind 59, S. 433–460, 1950
Turing, A. M.: On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem. In: Proceedings of the London Mathematical Society, Second Series 42, S. 230–265, 1936

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1149656**

Musterentstehung

Erst langsam beginnen wir, die Wirkung von Turings einflussreicher Arbeit zur Morphogenese zu verstehen.

VON JOHN REINITZ

Mit seiner Arbeit von 1952 über den Ursprung der Entstehung biologischer Muster löste Alan Turing ein Rätsel, an dem sich die Entwicklungsbiologen lange die Zähne ausgebissen hatten.

Am Ende des 19. Jahrhunderts hatten Hans Driesch (1867–1941) und später auch Hans Spemann (1869–1941) gezeigt, dass sich der Körper eines Tiers aus einer einzelnen strukturlosen Zelle entwickelt und nicht etwa aus einer mikroskopischen, vorgeformten Version – einem »Homunculus« beim Menschen – heranwächst. Driesch erkannte aber, dass diese Form der Selbstorganisation mit den damaligen theoretischen Mitteln nicht zu erfassen war. Was die Mathematiker vor der Erfindung des Computers zu lösen verstanden, waren – von seltenen Ausnahmefällen abgesehen – lineare Differenzialgleichungen; die jedoch können zwar die Entfaltung eines Musters beschreiben, nicht aber seine Entstehung.

In »The Chemical Basis of Morphogenesis« zeigt Turing, dass sich ein Muster tatsächlich aus dem Nichts bilden kann. Er betrachtet, wie der Embryo Schritt für Schritt, nur durch chemische Reaktionen und mechanische Kräfte getrieben, Strukturen bildet. Mit diesem modernen Zugang erforschen Biologen noch heute, wie Moleküle und Kräfte zwischen Zellen die embryonale Entwicklung steuern.

Turings Hauptaugenmerk galt den chemischen Mustern. Er prägte den Begriff »Morphogen« für eine abstrakte chemische Substanz, die im Stande ist, eine Gewebedifferenzierung auszulösen. Dieser Begriff wird jedem Molekularbiologen vertraut sein: Die Proteinprodukte der HOX-Gen-Cluster zum Beispiel, die im gesamten Tierreich für die Körperstrukturierung verantwortlich sind, sind Morphogene in Turings Sinn. Inzwischen wird der Begriff »Morphogen« allerdings in der Regel enger definiert, was zu mancherlei Verwirrung Anlass gibt.

Instabilität durch Diffusion

Am Anfang jeder Strukturbildung steht eine Symmetriebrechung. Die befruchtete Eizelle ist im Wesentlichen rotationssymmetrisch: Die Konzentration aller chemischen Stoffe in ihr ist an jedem Ort ungefähr dieselbe. Das ist offensichtlich nicht mehr der Fall, sobald spezifische Gewebe entstehen. Die fundamentalen physikalischen Gesetze können für diese Symmetriebrechung nicht verantwortlich sein, denn sie sind selbst symmetrisch. Das war jedenfalls der Stand des Wissens zu Turings Zeiten – was sich in der Zwischenzeit daran geändert hat, betrifft zwar die Kernphysik, aber kaum die Entwicklungsbiologie. Schon Turing befasste sich intensiv

mit solch fundamentalen Fragen; den Ursprung der Asymmetrie von Organismen suchte er in der Asymmetrie der biologischen Moleküle. Das Thema ist bis heute in der Diskussion, vor allem wenn es um die Entstehung des Lebens auf der Erde geht.

Innerhalb einer Zelle und in beschränktem Ausmaß zwischen Zellen ist die Diffusion allgegenwärtig: Jeder chemische Stoff strömt von Bereichen hoher Konzentration zu solchen, in denen er nur spärlich vorhanden ist. Damit gleicht die Diffusion Konzentrationsunterschiede aus und treibt sogar unsymmetrische Strukturen auf einen symmetrischen (homogenen) Zustand hin. Turings revolutionäre Erkenntnis besteht darin, dass die Diffusion im Gegensatz zu ihrer üblichen Wirkung geringe Unterschiede verstärken kann – unter zwei Voraussetzungen:

► An den chemischen Reaktionen sind mindestens zwei Morphogene mit erheblich verschiedenen Diffusionsraten (»Durchlässigkeiten«) beteiligt.

► Die chemischen Reaktionen sind nichtlinear, das heißt, die Rate, mit der sich die Konzentration eines Morphogens durch die chemische Reaktion ändert, ist nicht einfach dieser Konzentration oder der des anderen Morphogens proportional, sondern zum Beispiel dem Quadrat einer Konzentration oder dem Produkt der beiden.

Unter diesen Bedingungen entstehen aus kleinen Abweichungen von der Homogenität stabile Muster. In der mathematischen Darstellung ergeben sich nichtlineare Differenzialgleichungen. Analytische Mittel zur Lösung dieser speziellen Gleichungen gibt es bis heute nicht, und zur angenäherten, numerischen Lösung, die heute Standard ist, fehlten Turing die technischen Möglichkeiten. Also musste er die nichtlinearen Gleichungen durch lineare approximieren. Damit gelang ihm der Nachweis, dass sich in diesem System kleine Abweichungen von der Homogenität selbst verstärken.

Späte Entdeckung echter Morphogene

Der Einfluss von Turings Arbeit ist kaum zu überschätzen. Sie markiert den Übergang von der analytischen zur berechnenden (numerischen) Mathematik. Sein Beweis ist zwar analytisch; darüber hinaus enthält Turings Arbeit jedoch die erste rechnerische Simulation für Musterentstehung in Gegenwart von stochastischen Fluktuationen und ist wahrscheinlich die erste Veröffentlichung zur experimentellen Mathematik.

Turings Werk weist uns mit analytischen Argumenten aus dem 19. Jahrhundert den Weg zur computergestützten Wissenschaft des 21. Jahrhunderts. Sein Autor war sich allerdings bewusst, dass nichtlineare Wissenschaft und Entwicklungsbiologie weit fortgeschrittenere Berechnungsverfahren erfordern würden: »Der Hauptteil eines Organismus entwickelt sich die meiste Zeit über viel mehr von einem Muster hin zu einem anderen, als dass aus einem homogenen Zustand ein Muster entsteht.« Ihm war auch schon klar, dass selbst dann, wenn eine umfassende Theorie für solche Vor-

ANDY POTTS LIMITED

gänge nicht verfügbar sein sollte, sich dennoch Einzelfälle mit Hilfe des Computers modellieren lassen könnten.

Diesem Weitblick zum Trotz werden Turings Arbeiten sehr oft fehlinterpretiert – vermutlich hätte er einiges zurechtrücken können, wenn er nicht so früh und tragisch gestorben wäre. Seine analytischen Argumentationen werden häufig als biologische Vorhersagen missverstanden; aber so waren sie nicht gemeint. Turings hypothetisches System mit zwei Substanzen war eine Vereinfachung. Der eine der beiden Stoffe katalysiert die Synthese seiner selbst ebenso wie die des anderen und diffundiert langsam; der andere katalysiert den Abbau beider und breitet sich rasch aus. Für Muster, die sich mit der Zeit verändern, wäre eine dritte Substanz erforderlich. Von diesem abstrakten Modell bis zur Identifizierung der beteiligten Substanzen im lebenden Organismus ist es ein weiter Weg. Inzwischen ist ein neu entstandenes Forschungsgebiet auf diesem Weg schon weit vorgedrungen (SdW 5/1988, S. 88, 8/1991, S. 60, und 3/2010, S. 52).

Turing verdient Anerkennung dafür, eine neue Sicht auf die Entwicklungsbiologie eröffnet zu haben, die direkt den chemischen Reaktionen und mechanischen Kräften gilt, mit denen der Embryo seinen Körper aus einer einzelnen Zelle heraus selbst organisiert. Er war seiner Zeit weit voraus: Drei Jahrzehnte vergingen, bis Edward B. Lewis, Eric F. Wieschaus und Christiane Nüsslein-Volhard in Drosophila-Embryos echte Morphogene identifizierten, und noch weitere 15 Jahre, bis sie dafür gemeinsam 1995 den Nobelpreis für Medizin oder Physiologie erhielten. Es sind die jungen Forscher von heute, die am meisten von Turings Arbeiten profitieren werden – indem sie seine Ideen zur Morphogenese nicht als bloße Spekulation, sondern als begrifflichen Rahmen für die Lösung konkreter Probleme verstehen.

DER AUTOR

John Reinitz arbeitet in den Departments of Statistics, Ecology and Evolution sowie Molecular Genetics and Cell Biology an der University of Chicago.

QUELLEN

Kondo, S., Miura, T.: Reaction-Diffusion Model as a Framework for Understanding Biological Pattern Formation. In: Science 329, S. 1616–1620, 24. September 2010

Turing, A.M.: The Chemical Basis of Morphogenesis. In: Philosophical Transactions of the Royal Society of London B 237, S. 37–72, 1952

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1149657**

© Nature Publishing Group
www.nature.com
Nature 482, S. 464, 23. Februar 2012

Der Mann hinter der Maschine

Alan Turing ist heute für viele Leistungen berühmt. Doch es dauerte lange, bis seine Arbeiten Anerkennung fanden.

VON ANDREW HODGES

Alan Turing ist immer wieder in den Schlagzeilen – wegen seiner Bedeutung als Wissenschaftler, aber auch auf Grund seinee Verurteilung wegen homosexueller Handlungen (die bis 1967 in Großbritannien strafbar waren) im Jahr 1952 oder seines Selbstmords zwei Jahre später. Der damalige Premierminister Gordon Brown sprach zwar Jahr 2009 eine offizielle Entschuldigung für das aus, was die britische Justiz ihm angetan hatte, aber eine Kampagne für seine Begnadigung wurde Anfang Februar dieses Jahres abgewiesen.

Muss man eine bedeutende Persönlichkeit sein, damit einem die Regierung seine Homosexualität gnadenhalber verzeiht? Falls ja, wie bedeutend? Reicht es aus, die Enigma-Kodes entschlüsselt zu haben, die Nazideutschland im Zweiten Weltkrieg verwendete? Oder muss man auch noch den Computer erfunden haben, und künstliche Intelligenz obendrein?

Turing ist mittlerweile berühmt, aber es ist nicht einfach, seine Leistung genau zu beschreiben. Ist er der Erfinder des Computers? Historiker, die sich auf die technische Realisierung der ersten Rechenmaschinen konzentrieren, führen ihn nur unter »ferner liefen«. Heute ist allen Wissenschaftlern die Devise »publish or perish« (»veröffentliche oder geh unter«) geläufig. Turing hat über Computer einfach nicht genug veröffentlicht – und ist untergegangen. Seine Arbeiten über Berechenbarkeit (1936) und künstliche Intelligenz (1950) gehören zu den meistzitierten in der wissenschaftlichen Literatur, aber dazwischen klafft eine gewaltige Lücke. Seine detaillierten Pläne für Computer von 1946, 1947 und 1948 blieben unveröffentlicht. In keiner Fachzeitschrift brachte er die schlichte Aussage unter, dass er ausgearbeitet hat, wie die 1936 von ihm definierte »universelle Maschine« in den funktionierenden elektronischen Computer von 1945

umzuwandeln sei. Turing verpasste die Gelegenheit, Theorie und Strategie der Programmierung zu erklären, und verfing sich stattdessen in den technischen Feinheiten primitiver Speichermechanismen.

Nach 1949 hätte er seine Zeit an der University of Manchester nutzen können, um eine ausführliche Darstellung der Theorie und Praxis des Berechnens zu verfassen. Stattdessen begründete er ein völlig neues Gebiet der mathematischen Biologie und überließ die systematische Beschäftigung mit Computern anderen – die ihn darüber vergaßen. Das erste in Großbritannien veröffentlichte Buch über Computer, »Faster than Thought«, hat für Turings theoretischen Beitrag nur einen spöttischen Kommentar übrig:

»Türing-Maschine. Im Jahr 1936 schrieb Dr. Turing einen Artikel über den Aufbau und die Grenzen von Rechenmaschinen. Aus diesem Grund tragen sie gelegentlich seinen Namen. Der Umlaut ist eine unverdiente und unerwünschte Beifügung, die vermutlich der Unterstellung zuzuschreiben ist, alles derart Unverständliche müsse teutonischen Ursprungs sein.«

> Turing wurde ein Opfer seiner eigenen **Bescheidenheit**

Wer hat hier eigentlich wen zu begnadigen?

Das war das Klima, in dem Turing zu arbeiten hatte: Ein aktuelles Buch über Computer erklärt seine Theorie der Berechnungen für unverständlich. Turing selbst schrieb einen Beitrag zu dem Buch: In Kapitel 26 versteckt, erläutert er knapp den Begriff der Berechenbarkeit und seine Universalrechenmaschine. Die zurückhaltende Darstellung vermittelt jedoch nirgends den Eindruck, diese zentralen Begriffe stammten von ihm, oder gar, er habe die Computerrevolution geplant.

Der Mathematiker Max Newman, der 1955 für die Royal Society Turings Nachruf verfasste, tat seinem Schüler nicht gerade einen Gefallen mit der Behauptung, die Entwickler der Computer hätten nichts von Turings Arbeit aus dem Jahr 1936 gewusst. Die Turing-Maschine erlebte zwar bald darauf ein Comeback, aber ihr Erfinder galt als jemand, der sich nur mit mathematischer Logik ohne Bezug zu praktischen Anwendungen befasst hatte. Es war auch nicht hilfreich, dass jeder, der sich nach Turings Tod mit seiner Geschichte beschäftigte, kryptische Andeutungen verbreitete, Turing sei auf eine unaussprechliche Weise eine Persona non grata gewesen. Das mag verzeihlich sein, wenn es um einen entrückten Wissenschaftler an der Cambridge University geht; in Bezug auf den Begründer einer Megaindustrie ist es vollkommen unangebracht.

In der Mitte der 1970er Jahre wurde offenkundig, wer Turing tatsächlich war: die zentrale wissenschaftliche Figur im Hauptquartier für Dechiffrierung in Bletchley Park und verantwortlich für Methoden und die damals fortgeschrittensten Maschinen, mit denen die deutsche Marine geschlagen werden konnte. Das erklärte zugleich, warum er 1945 aus dem Nichts als Computerbauer auftauchte: Er hatte Erfahrungen gesammelt, die er vorher nicht offenlegen konnte. Zu Beginn der 1970er Jahre war auch die Zeit für seine Idee der Berechnung angebrochen. Programme »für jeden bekannten Prozess«, wie er sie im Jahr 1946 voraussah, wurden entwickelt. Turings Auffassung von Geist und Maschine, die aus seinem persönlichen Bewusstsein und seinen Erfahrungen erwuchs, wurde ebenfalls immer breiter akzeptiert. Als ich 1977 Turings Leben zu untersuchen begann, wurde mir klar, dass die Entschlüsselung der Enigma-Kodes die verborgene Brücke zwischen der Theorie von 1936 und der »praktischen Universalrechenmaschine« bildete, die Thema seiner unveröffentlichten Arbeit von 1948 war.

Über die Frage des eigenen Ansehens schrieb er in dem Bericht von 1948: »Der isolierte Mensch entwickelt keine intellektuelle Kraft. Es ist erforderlich, dass er in eine Umgebung eingebettet ist … Dann kann er vielleicht eine gewisse eigenständige Forschungsarbeit leisten und kleinere Entdeckungen machen … Die Suche nach neuen Techniken kann nur als eine Leistung der menschlichen Gemeinschaft insgesamt angesehen werden, nicht als das Produkt Einzelner.« Ja, so funktioniert Wissenschaft, und in diesem Sinn hat er sein Licht unter den Scheffel gestellt. Gleichwohl war er einer der Größten.

Was hätte Turing selbst von der Kampagne für seine »Begnadigung« gehalten? Als er inhaftiert wurde, zeigte er keine Reue und erklärte den Polizisten, er erwarte »die Legalisierung durch eine königliche Kommission«. 60 Jahre später hat das britische Gesetz diese Erwartung erfüllt, nicht speziell für seine Person, sondern prinzipiell – was Turings Vorstellung zweifellos näher kommt.

Für mich ist die Frage nicht, ob die Regierung Turing hätte begnadigen sollen, sondern wie Turing der Regierung jemals hätte verzeihen können. ~

DER AUTOR

Andrew Hodges ist Mathematiker an der University of Oxford. Er ist der Verfasser der großen Turing-Biografie (»Alan Turing: Enigma«, Berlin 1989).

QUELLE

Bowden, B. V. (Hg.): Faster than Thought: a Symposium on Digital Computing Machines. Pitman, London 1953

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1149658**

© Nature Publishing Group
www.nature.com

Nature 482, S. 441, 23. Februar 2012

Auf den nächsten Seiten folgt eine Sonderpublikation des Komitees für Astroteilchenphysik (KAT) >>>>

Katrin Wendland, Annette Werner (Hg.)
Facettenreiche Mathematik
Einblicke in die moderne mathematische Forschung für alle, die mehr von Mathematik verstehen wollen
Vieweg+Teubner, Wiesbaden 2011. 469 S., € 19,95

MATHEMATIK

Von den platonischen Körpern zu industriellen Spinnprozessen

25 Autorinnen stellen die »Königin der Wissenschaften« in ihrer ungeheuren Vielfalt dar.

Drei Jahre nach dem in Deutschland 2008 erfolgreich veranstalteten »Jahr der Mathematik« präsentiert dieses Buch das Spektrum des Fachs abermals in einer beeindruckenden Vielfalt. Die 22 kurzweiligen Beiträge sind ausschließlich von Frauen verfasst – was demonstriert, wie sich die Rolle von Mathematikerinnen im Hochschulbereich in den letzten 20 Jahren entwickelt hat. Die meisten Autorinnen sind Professorinnen und zwischen 30 und 50 Jahre alt. Jeder Beitrag stellt dem Publikum einen bewusst eingegrenzten Aspekt eines aktuellen Forschungsthemas in gut verständlicher Weise vor, so dass ein breiter Leserkreis angesprochen wird.

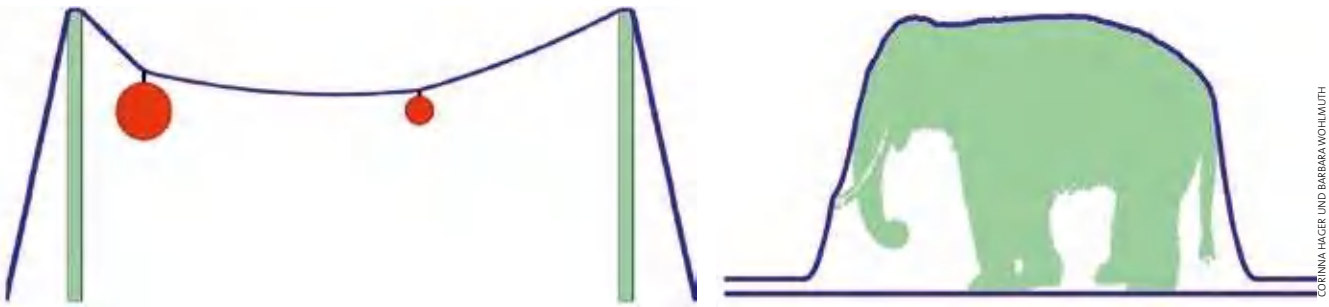
So machen Vicky Fasen von der ETH Zürich und Claudia Klüppelberg von der TU München in ihrem Beitrag »Modellieren und Quantifizieren von extremen Risiken« sehr anschaulich klar, wie schwer es ist, Vermeidungsstrategien für Naturkatastrophen, Finanz- oder Versicherungsproblematiken zu entwickeln, wenn vergleichsweise wenig Erfahrungswerte vorliegen (Spektrum der Wissenschaft 1/2010, S. 74). Anne Henke aus Oxford lässt die Lesergemeinde bei ihrem »Mathematischen Potpourri rund um das Einsteigen ins Flugzeug« den Stau in der Flugzeugkabine durchleben, bis alle Passagiere ihre zugewiesenen Sitzplätze eingenommen haben, und präsentiert anschließend interessante Lösungsalgorithmen für optimale Einstiegszeiten.

Sigrid Knust aus Osnabrück bietet unter dem Titel »Diskret optimierte Pläne im Alltag« Lösungen für Probleme, die zum Beispiel beim Aufstellen von Stunden-, Schicht- oder Sportligaspiel-Plänen auftreten – so ausgearbeitet, dass der Leser sie vielleicht selbst verwenden kann. Angela Stevens aus Münster wird mit ihrer Diskussion über die schnellste Skateboardbahn im Beitrag »Angewandte Analysis« sicher jugendliche Mathematikinteressierte neugierig machen, ebenso Priska Jahnke von der FU Berlin mit Fragen der Datenverschlüsselung und -entschlüsselung, auch wenn der Titel »Kugeln, Kegelschnitte, und was gibt es noch?« zunächst gar nicht nach Kryptografie klingt.

Offensichtlich haben die Herausgeberinnen auf eine gewisse Ausgewogenheit zwischen den Themengebieten Geometrie, Diskrete Mathematik, Analysis und Stochastik/Finanzmathematik geachtet. Im Übrigen streuen die Themen sehr breit, von elementaren bis zu sehr schwierigen Fragen, von klassischen zu aktuellen Problemen und vom Abstrakten bis zum Angewandten. Katrin Wendland aus Freiburg beginnt ihren Beitrag mit regulären Vielecken und den platonischen Körpern, um dann den Zusammenhang zwischen den verschiedensten Dreh- und Spiegelungsgruppen des Raums zu klären.

Gabriele Nebe aus Aachen steigt von der keplerschen Kugelpackung, deren Optimalität erst vor wenigen Jahren bewiesen wurde (Spektrum der Wissenschaft 4/1999, S. 10), auf zu Kugelpackungen in beliebig hohen Dimensionen und optimalen fehlerkorrigierenden Kodes. Annette Werners Artikel »Ausflug in die *p*-adische Welt« sowie Annette Huber-Klawitters Beitrag »Vermutung von Birch und Swinnerton-

Hindernis- und Kontaktprobleme: Corinna Hager und Barbara Wohlmuth von der TU München untersuchen, wie sich ein elastisches Medium verhält, wenn starre Hindernisse (links die Pfosten, rechts der Elefant im Bauch der Schlange aus »Der kleine Prinz« von Antoine de Saint-Exupéry) der Minimierung seiner Gesamtenergie entgegenstehen.



CORINNA HAGER UND BARBARA WOHLMUTH

Dyer« greifen berühmte Primzahlprobleme auf (Spektrum der Wissenschaft 1/2009, S. 62). Karin Baur aus Graz führt unter dem Titel »Polygone, Clusteralgebren und Clusterkategorien« mathematische Objekte ein, die erst seit wenigen Jahren bearbeitet werden. Die »Diskreten Strukturen in Geometrie und Topologie« von Eva-Maria Feichtner aus Bremen sind sehr theoretischer Natur, die »Asymptotische Modellierung industrieller Spinnprozesse« von Nicole Marheineke aus Erlangen sehr anwendungsbezogen.

Alle Aufsätze haben ähnlichen Umfang, und allen Autorinnen gelingt es, dem Leserkreis ohne besondere Mathematikvorbildung das jeweilige Problem klar und verständlich darzustellen. Wenn es allerdings an dessen Lösung geht, treten erhebliche Unterschiede zu Tage. Einige Beiträge bieten eine durchgängig nachvollziehbare Einführung in das Themengebiet, andere fordern vom Leser tiefes Eintauchen in Details, insbesondere beim Erfassen von Beweisen und Formelherleitungen. Das ist zum Teil mehr, als der Laie leisten kann.

Es wäre hilfreich gewesen, die Beiträge nicht alphabetisch nach den Namen der Autorinnen, sondern nach Themen zu sortieren. Zudem ist es einerseits lobenswert, dass jeder Beitrag für sich allein lesbar sein soll und somit Symbole wie etwa $n!$ (»n-Fakultät«) jedes Mal im Text erklärt werden, andererseits sind auf diese Weise unnötige Doppelungen entstanden. Ein kurzer Anhang der wichtigsten verwendeten mathematischen Werkzeuge wäre effektiver gewesen.

Insgesamt spricht aus allen Beiträgen unübersehbar eine große Begeisterung der Autorinnen für ihr Fach. Eine gemeinsame Botschaft aller Aufsätze ließe sich etwa so formulieren: Mathematik macht Spaß und hält nach wie vor unzählige spannende offene Fragen bereit, die auf Lösungen warten.

Petra Gummelt
Die Rezensentin ist promovierte Mathematikerin und arbeitet am Institut für Mathematik und Informatik der Universität Greifswald.

Frans de Waal
Das Prinzip Empathie
Was wir von der Natur für eine bessere Gesellschaft lernen können
Aus dem Englischen von Hainer Kober.
Hanser, München 2011. 352 S., € 24,90

VERHALTENSFORSCHUNG

Jenseits von Egoismus

Schon Tiere stehen einander bei – aber aus welchen Motiven?

Wieder hat der niederländische Ethologe Frans de Waal ein Buch geschrieben, das allein schon mit seinen oft verblüffenden Tiergeschichten fesselt. Eine Reihe davon kann der Primatenforscher von der Emory University in Atlanta (Georgia) selbst bezeugen – etwa die einer arthritischen Schimpansin, der Mitglieder ihrer Gruppe auf ein Sitzgerüst helfen, wo sie sich zu den anderen gesellen kann, oder die einer Elefantenkuh, die unzertrennlich zu einer blinden Artgenossin hält und ihr mit kollernden Lauten ihren Aufenthaltsort angibt.

Wohl ebenso viel Raum wie den Tieren widmet de Waal unserem eigenen Verhalten. Dabei reflektiert er verschiedenste Aspekte, etwa vom menschlichen Alltag, von der Entwicklung des sozialen und des Selbstverständnisses kleiner Kinder oder von ethnologischen Beobachtungen an den letzten »Naturvölkern«. Warum empfinden sozial Benachteiligte Ungerechtigkeiten stärker als vom Schicksal Begünstigte? Woher rühren Empathie und Sympathie wirklich? Wie vertragen sich Selbstsucht und Freiheitsliebe mit der Tendenz zu Hilfsbereitschaft und der Sehnsucht nach sozialer Nähe?

Wie immer wagt sich de Waal an das in der Wissenschaft heikle Unterfangen, soziales Verhalten psychologisch zu deuten. Aggression gegen Artgenossen und deren Kontrolle, Koalitionsbildung zum Zweck des Aufstiegs in der Hierarchie, Beschwichtigung für friedliches Zusammenleben – seine Themen behandeln das Spannungsfeld von sozialem Mit-, Für- und Gegeneinander.

In diesem fassettenreichen Band geht es de Waal vor allem darum, zu untersuchen, wo im Tierreich Mitfühlen und Hilfeleisten auftritt und inwieweit dies zum Verstehen von menschlichem Altruismus beiträgt. Dass es bei Affen ebenso wie bei manchen Nichtprimaten neben aller aggressiv getönten Durchsetzungsbereitschaft Empathie gibt, und das nicht einmal selten, steht seines Erachtens fest. Doch de Waal interessieren die verschiedenen Erscheinungsformen und Funktionen. Und er zieht immer wieder gern Linien zum Menschen, dessen Egoismen – und »böse« Seiten – er ebenso zur Sprache bringt wie das freundliche und helfende Empfinden und Tun.

Empathie und ähnliche Inhalte scheinen derzeit in der Ethologie zu einem neuen Modethema zu werden, nachdem jahrelang eher soziale Spannungen und aggressive Tendenzen im Zentrum standen. Der Ausgleich ist zu begrüßen. Frans de Waals Buch leistet dazu einen fundierten Beitrag.

Adelheid Stahnke
Die Rezensentin ist Biologin und Redakteurin bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

Hans Peter Duerr
Die Fahrt der Argonauten
Insel, Berlin 2011. 1111 S., € 34,90

ARCHÄOLOGIE

Wie kommt ein minoisches Siegel ins Watt?

Ein Ethnologe hat es gefunden und allerlei Theorien dazu aufgestellt – aber die Frage ist noch lange nicht geklärt.

Eigentlich war der Ethnologe Hans Peter Duerr mit seinen Studenten 1994 aus ganz anderen Gründen im nordfriesischen Watt: Er suchte zwischen den Inseln Pellworm und Nordstrand nach der mittelalterlichen Stadt Rungholt. Beim Durchstoßen des Watts mit Stangen kam jedoch höchst Überraschendes zu Tage: unter anderem einige Keramikscherben, Rohbernsteine, Weihrauch in Form einer Harzträne, vor allem aber ein ovalförmiges minoisches Siegel (»Lentoidsiegel«) aus Serpentin mit der Darstellung eines Stiers vorne und eines eingeritzten Schiffs sowie Linear-A-Schriftzeichen auf der Rückseite. Dieses datiert der Autor in die Zeitspanne vom Ende des 15. bis in die erste Hälfte des 14. Jahrhunderts v. Chr.

Bereits im Jahr zuvor hatte ein Wattläufer Duerr eine Keramikscherbe mediterranen Ursprungs geschenkt. Einen abgerundeten, durchlöcherten Kalksteinbrocken, zu dem ihm derselbe Wattläufer eine Beschreibung samt Zeichnung lieferte, interpretiert Duerr als Fragment eines Ankers aus antiken Zeiten.

Da ein derartiger Fund unweigerlich ungläubiges Kopfschütteln erregt, legte Duerr einige Keramikfragmente dem mittlerweile emeritierten Spezialisten Hans Mommsen vom Helmholtz-Institut für Strahlen- und Kernphysik der Universität Bonn vor. Die von diesem entwickelte Neutronenaktivierungsanalyse ergab ein Muster, das auch auf

Robert B. Laughlin

Der Letzte macht das Licht aus. Die Zukunft der Energie

Aus dem Englischen von Hartmut Reuter. Piper, München 2012. 400 S., € 22,99

Mit der Quantenmechanik begründet Physik-Nobelpreisträger Robert B. Laughlin, warum unsere Nachfahren noch in einigen 100 Jahren Autos mit Verbrennungsmotor fahren und nach dem Ende der Ölvorräte den Sprit dafür unter erheblichem Aufwand synthetisch herstellen werden. Der menschengemachte Klimawandel sei angesichts geologischer Zeitskalen bedeutungslos gegenüber dem Problem der Energieversorgung. Und der Homo oeconomicus von morgen werde eine Energiequelle von gestern nutzen, weil Laughlin ihr die besten Chancen auf gute Marktpreise einräumt: die Kernspaltung. Diese Gedankensammlung ist zwar kurzweilig, weil trockene Details in 160 Seiten Anhang verbannt wurden, aber – Nobelpreis hin oder her – inhaltlich so beliebig wie die vielen, teilweise ganz anders lautenden Spekulationen aus prominenten Federn zum selben Thema. MIKE BECKERS

Andrea Wulf

Die Jagd auf die Venus und die Vermessung des Sonnensystems

Aus dem Englischen von Hainer Kober. C. Bertelsmann, München 2012. 413 S., € 21,99

Am frühen Morgen des 6. Juni wird die Venus (von Mitteleuropa aus gesehen gerade noch) zwischen Erde und Sonne stehen und mit Teleskopen als kleines, dunkles Scheibchen vor der Sonnenscheibe sichtbar sein – der erste Transit seit 2004 und der letzte bis zum Jahr 2117. Die Historikerin und Journalistin Andrea Wulf hat rechtzeitig zum Ereignis die geschichtlichen Hintergründe in einem spannenden Sachbuch aufgeschrieben. Im Jahr 1716 rief der britische Astronom Edmund Halley seine Wissenschaftskollegen weltweit dazu auf, den Venustransit von 1761 – den Halley selbst nicht mehr erleben konnte – von möglichst vielen Orten aus zu beobachten. Das revolutionäre Projekt gelang und veränderte die Wissenschaft. Andrea Wulf nimmt uns mit zu den politischen Wirren des 18. Jahrhunderts und dem Bemühen der Forscher, die Welt im Geist der Aufklärung mit Hilfe der Vernunft zu begreifen – was auch heute noch nicht immer selbstverständlich ist. REINHARD BREUER

Norbert Vander (Regie), Benjamin Krause (Produktion)

Azoren. Auf den Spuren von Entdeckern, Walen und Vulkanen

KSM, Wiesbaden 2012. 155 Minuten, 3 DVDs, € 26,99; 3 Blue-ray-Disks mit 3-D-Version, € 39,99

Schon die erste der drei Episoden enttäuscht: minutenlang Fischschwärme in milchig-trüben Unterwasseraufnahmen, dazu ein öde dozierender Sprecher, der nur wenig zu sagen hat. Kein Vergleich zu den exzellenten Dokumentationen der BBC wie »Planet Erde«. In der zweiten Folge lernt man immerhin etwas über die Bevölkerung und den Vulkanismus. Aber auch hier ist die Kameraführung uninspiriert und repetitiv. Interessante Details wie die Ruinen eines Wellenkraftwerks können die Langeweile nur vorübergehend unterbrechen. Folge 3 wiederholt teilweise Inhalte und Aufnahmen der ersten beiden. Insgesamt werden nur wenige der neun Azoreninseln näher vorgestellt – die Hauptinsel São Miguel gar nicht. Zudem hätten die drei 50-Minuten-Folgen locker auf einer einzigen DVD Platz gehabt. Insgesamt trotz einiger netter Abschnitte also eine Mogelpackung. HARTWIG HANSER

Matt Ridley

Wenn Ideen Sex haben. Wie Fortschritt entsteht und Wohlstand vermehrt wird

Aus dem Englischen von Gabriele Gockel und Barbara Steckhan. DVA, München 2011. 544 S., € 24,99

Der Titel wirkt reißerisch abstoßend, trifft den Inhalt aber genau. In Anlehnung an die Mem-Theorie von Richard Dawkins sieht der britische Zoologe Matt Ridley den Erfolg der Menschheit im steten Austausch von Ideen begründet, die sich in den Gehirnen gegenseitig befruchten und dabei neue Ideen gebären. Durch immer schnellere Kommunikationsmittel habe sich dieser Austausch beschleunigt und uns rasant ansteigenden Wohlstand beschert. Aus dieser Analyse leitet der Autor eine grandios optimistische Sicht der Zukunft ab, die auch der Klimawandel nicht gefährde: Unsere Enkel werden so viel reicher sein als wir, dass sie sich Anpassungsmaßnahmen locker leisten können. Kulturpessimismus war gestern, und Grenzen des Wachstums gibt es nicht. Kleinigkeiten wie Erschöpfung der Ressourcen oder Verschmutzung der Umwelt können den Erfindungsreichtum des Menschen nicht bremsen. Auf denn mit Vollgas in eine stetig bessere Welt! GERHARD TRAGESER

zentralkretischem Material aus dem 15. bis 14. vorchristlichen Jahrhundert zu finden ist.

Demnach wären minoische Seefahrer vor etwa 3300 Jahren von der Südküste Zentralkretas aus bis in die Nordsee und damit weit über die Grenzen der damals bekannten Welt hinaus vorgedrungen – eine kühne, aber nicht unmittelbar von der Hand zu weisende These. Immerhin kamen wenige Jahrhunderte später die Phönizier nachweislich bis an die Atlantikküsten Marokkos und Portugals und erwarben Erze aus Spanien; dass sie bis zu den »Zinninseln« (England) vorgestoßen sind, liegt nahe und wird seit Langem diskutiert, wenn auch bisher eindeutige Belege fehlen.

Was könnte die Minoer veranlasst haben, zu einer so überaus beschwerlichen und gefährlichen Reise mit ungewissem Ausgang aufzubrechen? Möglicherweise, so Duerr, waren sie auf der Suche nach Rohstoffen wie Zinn und Bernstein, die einfacher nicht zu haben waren.

Nach Duerrs Überzeugung gehen die Argonautensage und die Odyssee auf reale »Jenseitsfahrten« zurück

In erster Linie aber vertritt er die These, es habe sich um eine »Jenseitsfahrt« gehandelt. Der Begriff hat verschiedene Bedeutungen; eine davon ist der Aufstieg in den Olymp. Seit den homerischen Gedichten findet sich in der griechischen Literatur die Idee, dass besondere Beziehungen zu den Göttern oder herausragende Qualitäten an sich es ermöglichen, dem Tod zu entkommen und unsterblich zu werden. Auch leben nach der Überlieferung einige Heroen, die vor Theben oder Troja kämpften, auf den Inseln der Seligen. Demnach hätten die Seefahrer die Unsterblichkeit oder zumindest unsterblichen Ruhm angestrebt. Duerr nimmt an, dass sie darüber hinaus »sich selber mit den mythischen Prototypen identifiziert haben und als solche gesehen wurden«.

Andererseits kann eine Jenseitsfahrt auch eine Reise in die Unterwelt bedeuten. So fährt Odysseus auf den Rat der Zauberin Kirke hin über den Okeanos in den Hades, um den Seher Teiresias nach seinem Schicksal zu befragen.

Mehr noch: Duerr stellt die Hypothese auf, die Argonautensage und die Odyssee seien auf eine reale Fahrt wie diese zurückzuführen, und bezieht damit Position in einem seit dem 19. Jahrhundert andauernden, kontrovers geführten Forschungsstreit. Die Diskussion darüber, ob die genannten Mythen auf tatsächliche historische Ereignisse zurückgehen, fand ihren Höhepunkt von 2001 bis 2005 in der Auseinandersetzung zwischen dem Archäologen Manfred Korfmann und dem Althistoriker Frank Kolb. Heute ist sie als Troja-Debatte bekannt.

Mit Hilfe verschiedener Theorien gelangt Duerr im Lauf des Werks von der Argonautensage zu deren mutmaßlichem historischem Kern. Dieser sei in wesentlichen Teilen minoischen Ursprungs. In der Tat finden sich ja auch bronzezeitliche Elemente in homerischen Epen.

Duerr ist darum bemüht, das damalige, nach seiner Überzeugung historische Geschehen dem modernen Menschen näherzubringen, indem er es nach seinen Vorstellungen rekonstruiert. Besonders bemerkenswert sind die kulturübergreifenden Betrachtungen, mit denen er seine Ausführungen im gesamten Verlauf des Buchs untermauert. So zieht er Parallelen zu mittelalterlichen und neuzeitlichen Geschehnissen, wobei auch andere mutige Seefahrer wie Kolumbus oder James Cook Erwähnung finden. Zudem finden sich durch das ganze Werk hindurch, besonders in Kapitel 7, Aussagen über die Fruchtbarkeits- und Vegetationsgottheiten sowie über Riten in unterschiedlichsten Regionen und Zeiten. Nur tragen diese Exkurse zur Archäologie nichts bei.

Der wissenschaftliche Apparat aus Anmerkungen, Literaturverzeichnis und Register nimmt fast die Hälfte des umfangreichen Werks ein. 25 farbige Bildtafeln mit Ansichten des Rungholtwatts und Abbildungen der Funde sowie 308 Schwarz-Weiß-Abbildungen im Text ergänzen die Darstellung; Abbildungsnachweise fehlen.

Die Publikation ist unverkennbar das Werk eines Ethnologen; sie liefert einige einfallsreiche Theorien zu diversen Fragestellungen. Zudem bereichern und erweitern die Exkurse in die Götter- und Mythenwelt die Lektüre.

Was seine Hauptthese angeht, bleiben allerdings viele Fragen offen. Selbst für Duerr ist die Annahme, die Minoer hätten sich zu so früher Zeit über die Meerenge von Gibraltar, den stürmischen Atlantik und den Ärmelkanal bis in die Nordsee gewagt und wären dort lebend angekommen, wohl etwas zu kühn. Ersatzweise schlägt er vor, sie wären mit ihrem Schiff einen Fluss zum Beispiel in Spanien aufwärtsgefahren, hätten es an geeigneter Stelle zerlegt und dann über Land weitertransportiert. Das ist auch nicht besonders plausibel.

Zu allem Überfluss liegt Duerr in einem Streit mit den etablierten Archäologen, der von außen kaum zu durchschauen ist. In seinem Nachwort zu dieser Auseinandersetzung geht er so weit, der anderen Seite zu unterstellen, man wolle ihn mit wilden Behauptungen in Misskredit bringen: Die Funde seien ihm untergeschoben oder gar von ihm selbst dort deponiert worden. Dagegen kontern die amtlichen Archäologen, Duerr habe ohne Erlaubnis und damit illegal gegraben.

In dem dicken Wälzer hat Duerr eine Fülle von Fakten aus unzähligen Forschungsbereichen zu einer spannend zu lesenden Geschichte zusammengetragen. Nur ist für jede seiner Theorien das archäologische Material zu dünn. Abhilfe aus dieser allseits unbefriedigenden Diskussion könnte nur eine Gesamtpublikation der Funde zum Zweck einer wissenschaftlichen Untersuchung schaffen.

Veronika Straub

Die Rezensentin studiert klassische Archäologie an der Universität Hamburg.

James Gleick

Die Information

Geschichte, Theorie, Flut

Aus dem Englischen von Almuth Braun.

Redline, München 2011. 527 S., € 24,99

WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Die Informationierung der Welt

James Gleick hat ein Monumentalwerk über die Vor- und Nachgeschichte von Claude Shannons epochaler Theorie vorgelegt.

Mit Bestsellern wie »Chaos« und »Genius« hat James Gleick gezeigt, dass er eine große Fülle von Material zu einem Wissenschaftsgebiet zu einem umfangreichen, gleichwohl für den Laien attraktiven Buch aufzubereiten versteht. Mit seinem neuen Werk erhebt er keinen geringeren Anspruch, als »die Geschichte der Information« darzulegen.

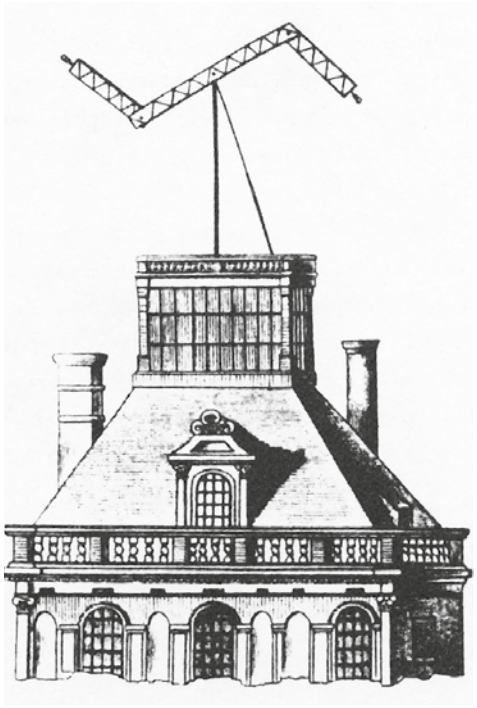
Dabei geht es weniger um die Bedeutung von Information, zum Beispiel ihre Interpretation durch den Menschen, als um technische Fragen der Informationsübertragung und -verarbeitung sowie ein abstraktes und exaktes Konzept. Dreh- und Angelpunkt seiner Darstellung ist die Informationstheorie Claude Shannons (1916–2001). Ähnlich wie Newton aus Begriffen wie Bewegung, Masse und Kraft exakt definierte, zahlenmäßig bestimm- und berechenbare Größen machte, klärte Shannon den bis dahin eher unbestimmten Begriff Information. Die Maßeinheit wurde das Bit.

Doch bevor der Leser dorthin gelangt, liegen noch einige Kapitel vor ihm. Gleick erzählt von Frühformen der Nachrichtenübermittlung – Leuchtfeuer während des Trojanischen Kriegs oder Trommeln, deren Klang mit großer Geschwindigkeit über den Niger hallte – und der Entstehung der Schrift, die er als Voraussetzung von Wissenschaft und Philosophie darstellt, eine nicht unumstrittene These.

Schon Ende des 18. Jahrhunderts konnte man angeblich ein Signal in zehn bis zwölf Minuten von Paris ins 700 Kilometer entfernte Toulon schicken: An 120 optischen Telegrafenstationen beobachtete jeweils ein Telegrafist mit dem Fernrohr die Signale der Nachbarstation und wiederholte sie dann für den Nachfolger in der Kette in Form von Stellungen der hölzernen Arme an einem hohen Gerüst (Bilder unten).

In der Darstellung folgen – historisch korrekt – die elektrische Telegrafie und das Telefon. Letzteres erforderte komplexe Relaisschaltungen, was Gleick Gelegenheit gibt, deren formale Beschreibung durch symbolische Logik oder – was auf dasselbe hinausläuft – die boolesche Algebra einzuführen. Bei dieser Gelegenheit handelt er auch gleich die Grundlagenkrise der Mathematik um 1900 ab, als der Plan scheiterte, die ganze Mathematik auf die Logik zurückzuführen.

Viele Seiten widmet Gleick dem Erfinder und Mathematiker Charles Babbage (1791–1871), der versuchte, seine visionären Pläne einer mechanischen Re-



In den Wirren der Französischen Revolution gelang es dem Geistlichen und Techniker Claude Chappe (1763–1805) gemeinsam mit seinen Brüdern Abraham und Ignace, ein System aus mechanischen »Telegrafen« (Schemazeichnung links) einzuführen, das später ganz Frankreich überspannte. Rechts der Telegraf auf dem Pariser Montmartre

Mathematics of Planet Earth 2013

WETTBEWERB ZU
VIRTUELLEN EXPONATEN
FÜR EINE OPEN SOURCE
AUSSTELLUNG
IM JAHR 2013

www.mpe2013.org/competition

Die Mathematik des Planeten Erde

Wieviel Mathematik in unserem Planeten steckt und wie wir sie für uns nutzen können, behandelt die weltweite Initiative „Mathematik des Planeten Erde 2013“ (MPE2013). Das Ziel dieses Projektes ist es, die Mathematik der Erde in Ausstellungen, Konferenzen, Publikationen, Museumsinstallationen und anderen Veranstaltungen zu vermitteln. Die Themen sind zahlreich: von neuesten Erkenntnissen zu Quasikristallen, der Mathematik der GPS-Ortung, der Wettervorhersage oder den Algorithmen in Suchmaschinen bis hin zu Bevölkerungsmodellen und Klimasimulationen sowie der Mathematik des sozialen Wandels. Wie wurde das U-Bahnsystem in Berlin verbessert? Kann man die Aschewolken der Vulkanausbrüche in Island oder Chile simulieren? Wie breiten sich Epidemien aus? Was würde passieren, wenn die Antarktis schmelzen oder der Mond die Erdachse nicht mehr im Gleichgewicht halten würde?

Eine offene Ausstellung

Als einer der Höhepunkte im Jahr 2013 wird eine Ausstellung organisiert, deren Inhalte frei unter einer offenen *(open source)* Lizenz erhältlich sind. Dazu wurde ein Wettbewerb ausgeschrieben, über den diese Exponate - virtuelle Exponate wie Bilder, Filme, Programme oder Baupläne für physische Exponate – gesammelt und prämiert werden. Die Gewinnermodule werden von Partnermuseen produziert und im Jahr 2013 ausgestellt.

In Deutschland haben bereits drei Museen als Partner zugesagt: das Technische Museum in Berlin, das Mathematikum in Giessen und das Museum für Mineralien und Mathematik (MiMa) in Oberwolfach.

Die Module werden auch für Wanderausstellungen weltweit über eine Plattform zum Download bereit stehen und bilden so die erste große, den Planeten umfassende und freie Ausstellung, die virtuell und real gezeigt werden kann. Die Plattform wird in Zusammenarbeit mit dem Projekt IMAGINARY des Mathematischen Forschungsinstituts Oberwolfach erstellt.

Aufruf zum Mitmachen

Alle Personen oder Institutionen sind eingeladen, an dem Wettbewerb zu den virtuellen Modulen für diese einzigartige Ausstellung teilzunehmen. Auch Museen, Ausstellungen oder Schulen sind aufgerufen, sich an dieser Initiative zu beteiligen.

Ausstellungswettbewerb

Exponate in folgenden Formaten werden gesucht:

Bauplan/Idee für ein Exponat

Programm/Idee für ein interaktives Exponat

Filme oder Bilder

Die Preise sind:
1. Preis: US$ 5000
2. Preis: US$ 3000
3. Preis: US$ 2000

Der Wettbewerb endet am 20.12.2012. Beispiele und Ideen für Exponate gibt es auf der Webseite des Wettbewerbs.

Links:
www.mpe2013.org
www.mpe2013.org/competition
www.spektrum.de/mpe2013

UNESCO
United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

Under the patronage of **UNESCO**

Carsten Könneker
Wissenschaft kommunizieren
Ein Handbuch mit vielen praktischen Beispielen
Wiley-VCH, Weinheim 2012. 216 S., € 24,90

IN EIGENER SACHE

Wie können Wissenschaftler die eigene Forschung so erklären, dass möglichst viele Menschen etwas davon haben? »Spektrum«-Chefredakteur Carsten Könneker hat darüber ein Buch geschrieben. Anhand zahlreicher Beispiele aus der redaktionellen Praxis erläutert er, wie man gute Vergleiche und Metaphern findet, um komplexe Sachverhalte zu veranschaulichen, und wie man so formuliert, dass das jeweilige Publikum informiert und unterhalten ist. Die einzelnen Kapitel geben Tipps und Tricks unter anderem zu den Themen Vortrag, Interview, Meldung, Kommentar, Blogpost, Überschrift, Vorspann und Bildunterschrift.

chenmaschine umzusetzen (Spektrum der Wissenschaft 4/1993, S. 78), und damit als früher Pionier des Computers anzusehen ist. Über den bedeutenden Mathematiker und Logiker Alan Turing (siehe S. 80) und sein Werk kommt Gleick allmählich zum Hauptthema.

Wie Turing, der im Zweiten Weltkrieg beim Entschlüsseln der deutschen Geheimnachrichten Bahnbrechendes leistete, interessierte sich Claude Shannon für Kodes. Der Datenstrom, der einem Kodeknacker vorliegt, ist zunächst von strukturlosem Datenmüll nicht zu unterscheiden. Er muss aber eine verborgene Struktur haben, sonst wäre er für den Empfänger wertlos.

In der deutschen Sprache folgt mit großer Wahrscheinlichkeit auf ein c ein h, im Englischen auf ein t ein h. Manche Teile eines Textes sind durch den Kontext so eindeutig bestimmt, dass sie »überschüssig« (redundant) sind. Jeder Leser des Englischen kann aus dem Fragment »If u cn rd ths …« die vollständige Version »If you can read this …« rekonstruieren. Die Redundanz eines Textes in natürlicher Sprache steckt als verborgene Struktur auch in dessen chiffrierter Form; sie ist nicht so leicht zu erkennen, bietet aber dem Kodeknacker eine Handhabe zur Entschlüsselung.

Solche Überlegungen führten Shannon zu seinem Begriff von Information. Das ist nicht etwa nur eine Datenmenge, die man als die Anzahl der verwendeten Zeichen messen kann. Vielmehr enthält ein Zeichen weniger Information als andere, wenn seine Wahrscheinlichkeit hoch ist, und im Extremfall gar keine, wenn diese gleich 1 ist, wenn also der Empfänger schon sicher ist, dass dieses Zeichen dort stehen muss. Daher enthalten die beiden oben genannten Texte nach Shannon die gleiche Information, obgleich die Datenmenge des ersten kleiner ist. In die Definition der Information gehen also die Wahrscheinlichkeiten der Zeichen in einem Text mit ein.

Shannons Theorie hat verschiedensten Gebieten der Wissenschaft zur Blüte verholfen. Norbert Wiener (1894–1964), der Begründer der Kybernetik, konstruierte Analogien zwischen technischen und organischen Systemen, insbesondere zwischen dem Computer und dem menschlichen Gehirn, und prognostizierte, dass beide einander immer ähnlicher werden würden. Die Informationstheorie hilft bei der Entschlüsselung des Genoms; die von dem Evolutionsbiologen Richard Dawkins eingeführte Analogie zwischen dem (biologischen) Gen und dem (kulturellen) »Mem« lebt davon, dass beide als Stücke von Information interpretiert werden.

Der Mathematiker und Philosoph Gregory Chaitin baut seine Berechenbarkeitstheorie unmittelbar auf Shannons Informationsbegriff auf und erkennt sogar die »Zufälligkeit« als ein gemeinsames Element von Quantenphysik (heisenbergsche Unschärferelation), Logik (gödelscher Unvollständigkeitssatz) und Informationstheorie (Spektrum der Wissenschaft 2/2004, S. 86, und 9/2006, S. 54).

Gleick ist ein visionärer Autor. Sein Buch ist die Frucht umfangreicher Recherchen, bringt aktuelle wissenschaftshistorische Erkenntnisse und regt den Leser durch manch überraschenden Zusammenhang zum Nachdenken an. Allerdings stolpert Gleick an einigen Stellen über seine Begeisterung, indem er unwesentlichen Details zu viel Raum gibt. Der zum Teil sehr unstrukturierte Aufbau und Wiederholungen tragen zusätzlich dazu bei, den Leser zu irritieren. Es ist für jeden etwas Spannendes und etwas Langweiliges dabei.

Die Übersetzung aus dem Englischen ist gut gelungen. Einige Stellen, an denen Gleick amerikanisches Hintergrundwissen voraussetzt, sind durch Anmerkungen zur deutschen Ausgabe verständlich gemacht worden.

Bei aller Materialfülle nimmt Gleick einen technokratischen Standpunkt ein – so konsequent, dass er Gedanken zum Verstehen von Information durch den Menschen oder zur Philosophie selbst dort weglässt, wo sie sich aufdrängen. Seiner leidenschaftlich vorgebrachte Vision, die moderne Physik auf eine Art Quanteninformationstheorie zu reduzieren, fehlt eine gründliche Reflexion ebenso wie seiner Darstellung der Theorie der Meme.

Und dennoch: Gleicks Projekt einer Gesamtdarstellung des Informationsbegriffs ist mutig, bisher einmalig und im Wesentlichen gelungen.

Roland Pilous
Der Rezensent ist Diplommathematiker und arbeitet als Lehrkraft für besondere Aufgaben an der Universität Hannover.

Christian Ucke und H. Joachim Schlichting
Spiel, Physik und Spaß
Physik zum Mitdenken und Nachmachen
Wiley-VCH, Weinheim 2011. 146 S., € 24,90

PHYSIK

Bastelspiele für Physiklehrer

Ein Sammelband ergründet die Naturgesetze hinter Kinderspielzeugen und Alltagsphänomenen – leider auf einem Niveau, das nur Leser mit Vorbildung anspricht.

Physik und Spaß – was Physiklehrer und ihre Schüler eher schmerzlich als Gegensatz erleben, packen die Physikdidaktiker Christian Ucke und H. Joachim Schlichting zwischen Buchdeckel. 44 Beispiele aus dem Alltag sollen Experimentierfreude und kindliche Neugier fördern und so Jung und Alt zum »physikalischen Beschreiben und Argumentieren verführen«.

Die Bandbreite der jeweils auf zwei bis drei Seiten geschilderten Effekte ist bemerkenswert. Anhand einer schlichten Büroklammer lässt sich etwas über den Bau einer Hängebrücke lernen. Ein Kinderspielzeug wie der Pustekreisel weist eine interessante Mechanik auf. Eine Weihnachtspyramide kann man als Aufwindkraftwerk begreifen und einen Ahornsamen als einflügeligen Hubschrauber. Bei dem auf dem Buchtitel abgebildeten »trinkenden Storch«, der immer wieder von selbst seinen Schnabel in ein Wasserglas senkt, vermutet man einen komplexen Mechanismus – und ist dann überrascht, dass das durstige Federvieh so ähnlich funktioniert wie ein Kühlschrank.

Der Schwerpunkt des Buchs liegt auf der klassischen Mechanik, mit besonderer Vorliebe für den Kreisel, dem gleich vier Artikel gewidmet sind, während der große Fundus an elektromagnetischen Phänomenen gerade einmal mit drei Beiträgen bedient wird.

Stets schlüsseln die Autoren die physikalischen Prinzipien hinter den teils kuriosen Effekten auf; mitunter sorgen historische Anekdoten für Auflockerung. Kästen stellen vertiefende Mathematik oder eine Bastelanleitung zum Nachmachen bereit. Alle Kapitel sind mit ansprechenden Fotos und Grafiken bebildert.

Die allermeisten der Artikel sind in den letzten Jahren bereits in der Zeitschrift »Physik in unserer Zeit« erschienen – und den Beiträgen der Rubrik »Schlichting!« in »Spektrum der Wissenschaft« nicht ganz unähnlich. Das Niveau schwankt beträchtlich; manche Artikel meinen es etwas zu genau mit der wissenschaftlichen Akribie und gleiten nach wenigen Sätzen in den schwer zugänglichen Stil eines Physiklehrbuchs ab. Dass es auch eingängiger geht, zeigen etwa die Beiträge zu optischen Spielereien mit Weingläsern oder der Artikel zu den physikalisch-chemischen Prozessen im Inneren einer Lavalampe.

Aber auch für die didaktisch ansprechenderen Beiträge braucht man ungefähr ein Grundstudium in Physik. Und ganz so einfach ist das Nachmachen nicht. Ich hatte beträchtliche Mühe, aus einer handelsüblichen Büroklammer einen einfachen Kreisel zu formen. Im Anhang findet sich allerdings eine Liste mit Onlineshops, bei denen die meisten der vorgestellten Kuriositäten zu bestellen sind. Das ist wohl vor allem für Lehrer oder Dozenten der Experimentalvorlesung interessant – damit Physik auch im Unterricht Spaß machen kann.

Robert Gast
Der Rezensent hat Physik und Philosophie studiert; er arbeitet als freier Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

Dieses Fahrzeug wird vom Wind angetrieben und rollt trotzdem gegen den Wind! Die Kraft des rotierenden Propellers wird dabei über ein Gummiband auf das Antriebsrad übertragen. Im theoretischen Grenzfall, bei dem Rollreibung und Luftwiderstand des Gestells vernachlässigt werden, fährt das Gerät sogar mit der doppelten Windgeschwindigkeit.

H. JOACHIM SCHLICHTING

Bücher und mehr

NEU

Stefan Korth, Bernd Koch

STARS AM NACHTHIMMEL

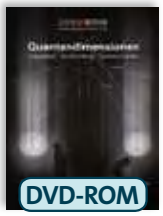
Der sichere Wegweiser zu den 50 schönsten Himmelsobjekten

2., überarb. Aufl. 2012, 151 S. m. zahlr., meist farb. Abb., Kosmos

Bestell-Nr. 3499

€ 16,99 (D), € 17,50 (A)

Sternhaufen, Galaxien und Gasnebel: Mit dieser Anleitung fällt es leicht, die Stars am Nachthimmel zu entdecken. Ob mit bloßem Auge, Fernglas oder Teleskop – hier finden Sie den Weg zu den Attraktionen des Universums. Und das geht ganz einfach per »Starhopping«: keine Koordinaten, kein Computer – dieses Buch genügt. Für jedes Objekt gibt es eine eigene, speziell entwickelte Sternkarte, eine genaue Wegbeschreibung und ein wunderschönes Foto. So wird die Beobachtungsnacht zum unvergesslichen Erlebnis!



Mitarbeit: Stefan Heusler

QUANTENDIMENSIONEN, DVD-ROM

Doppelspalt – Verschränkung – Quantencomputer

2010, in DVD-Box., für PC und Mac, Lehr-Programm gem. § 14 JuSchG., Klett, Sciencemotion

Bestell-Nr. 3552 € 29,95 (D), € 29,95 (A)

Diese ausgefuchste Lernsoftware bringt Licht in die mysteriöse Quantenwelt!

Mit den beiden Detektoren Alice und Bob begeben wir uns auf die faszinierende Reise in die Quantendimensionen von Licht. Wie lässt sich Licht beschreiben, woraus besteht es und wie verhält es sich? Auf der Suche nach Antworten nähern wir uns dem Licht auf zwei verschiedene Weisen – im Spielfilm »Schattenwelten« und anhand von 14 Lernstationen auf der U-Bahn-Linie 1, der Nonlocality Line. Diese Lernsoftware zur Quantenphysik wurde von Physik-Didaktikern der Universität Münster entwickelt. Ein großer Spaß für alle Physikinteressierten und auch ideal für den Unterricht in der Oberstufe.

Gian Francesco Giudice

ODYSSEE IM ZEPTORAUM

Eine Reise in die Physik des LHC

2012, 372 S. 70 SW-Abb., geb., Springer

Bestell-Nr. 3551

€ 24,95 (D), € 25,70 (A)

Seit Ende 2009 läuft das ambitionierteste wissenschaftliche Experiment aller Zeiten mit Rekordenergie – und doch sind seine Ziele der Allgemeinheit wenig verständlich. Dieses Buch versetzt jedermann in die Lage, die unmittelbar bevorstehenden Entdeckungen beim Teilchenbeschleunigerprojekt des Large Hadron Collider (LHC) am CERN zu verfolgen und nachzuvollziehen. Es lädt den Leser ein, die Theorie der Teilchenphysik mit den Augen eines Insiders zu betrachten. Im letzten Kapitel geht der Autor auf die Bedeutung der Forschungen am LHC für die Kosmologie ein.

NEU

Lisa Randall

DIE VERMESSUNG DES UNIVERSUMS

Wie die Physik von morgen den letzten Geheimnissen auf der Spur ist

2012, 490 S. m. Abb., geb., Fischer

Bestell-Nr. 3496

€ 24,99 (D), € 25,70 (A)

In ihrem neuen Buch berichtet die Physikerin Lisa Randall aus den Laboren und Denkfabriken ihrer Kollegen: Welchen Fragen gehen Physiker heute nach? Welche Rolle spielen so gigantische Apparate wie der Teilchenbeschleuniger LHC am CERN? Was hat es mit der Suche nach dem Higgs-Boson auf sich? Wie hängt angewandte mit theoretischer Physik zusammen?

Lisa Randall zeichnet das Bild der gegenwärtigen Physik in all ihren Facetten und lässt ganz konkret werden, wie die moderne Grundlagenforschung funktioniert.

Bestellen Sie direkt: +49 6221 9126-841 @ info@science-shop.de

Patrick Wyse Jackson

PALÄONTOLOGIE FÜR NEUGIERIGE

Was Sie schon immer über Fossilien, Erdgeschichte und Evolution wissen wollten

2012, 95 S. m. 60 Farbabb., geb., Primus Verlag

Bestell-Nr. 3532 € 19,90 (D), € 20,50 (A)

Eine kompakte Einführung in die Paläontologie!

Patrick Wyse Jackson erklärt anschaulich, wie und warum Fossilien erhalten blieben, wie sie klassifiziert werden und welche Informationen sie über die Geschichte der Erde liefern.

Robert Yarham

LANDSCHAFTEN LESEN

Die Formen der Erdoberfläche erkennen und verstehen

2012, 256 S. m. zahlr. farb. Abb., geb., Haupt

Bestell-Nr. 3529

€ 24,90 (D), € 25,60 (A)

Anhand sorgfältig ausgewählter Fotos und Illustrationen erklärt dieses reich illustrierte Buch die Entwicklung der Landschaften und die Entstehung ihrer Formen. Dieser nützliche Reisebegleiter unterstützt beim »Lesen« der Landschaft, zeigt, wie das, was wir in der Landschaft sehen, zu deuten ist und erklärt die wichtigsten Prozesse, die die Landschaftsformen vor unseren Augen geschaffen haben.

Besuchen Sie uns im Internet unter:
www.science-shop.de

NEU

Florian Freistetter

KRAWUMM!

Ein Plädoyer für den Weltuntergang

2012, 210 S. m. zahlr. Abb., geb., Ecowin

Bestell-Nr. 3497

€ 22,90 (D), € 22,90 (A)

Ob nun Planeten aufeinanderprallen, Galaxien zusammenstoßen oder gar ganze Universen kollidieren: Die Folgen sind immer dramatisch. Kollisionen bringen aber nicht nur Zerstörung. Sie stehen auch am Anfang aller Dinge, ohne sie würde es kein Leben auf der Erde geben. Sehen Sie aus sicherer Entfernung dabei zu, wie alles in einander kracht, was im Weltall in einander krachen kann! Von Asteroideneinschlägen bis hin zu ganzen Universen, die zusammenstoßen, werden Sie die verschiedensten Kollisionen erleben und dabei feststellen, dass wir den kosmischen Katastrophen viel zu verdanken haben.

NEU

Stefan Ineichen, Bernhard Klausnitzer, Max Ruckstuhl

STADTFAUNA

600 Tierarten unserer Städte

2012, 434 S. m. 600 Farbfotos, geb., Haupt

Bestell-Nr. 3521

€ 29,90 (D), € 30,80 (A)

Von der Laus bis zum Wildschwein – 600 tierische Stadtbewohner im Porträt!

Städte sind nicht nur von Menschen bewohnt, sondern bieten auch einer großen Vielfalt von Tieren Wohnraum und Nahrung. Diesen erstaunlichen Artenreichtum macht die »Stadtfauna« sichtbar. Die allesamt mit Farbfotos illustrierten, von Spezialisten verfassten Artporträts geben Auskunft über Lebensweise und Verbreitung der Tiere, die städtische Gärten und Gebäude, Bahnareale und Blumenwiesen, Gewässer und Stadtwälder besiedeln. Das hier vereinigte Wissen stellt einen einzigartigen Überblick über die städtische Fauna in Mitteleuropa dar.

NEU

Michael Stocker, Sebastian Meyer

WILDTIERE

Hausfreunde und Störenfriede

2012, 352 S. m. 120 Farbfotos u. 100 Zeichn, geb., Haupt

Bestell-Nr. 3522

€ 29,90 (D), € 30,80 (A)

Dieses Buch lädt ein auf einen Rundgang durch Haus und Garten – aufs Dach und auf den Dachboden, ans Fenster und auf den Balkon, an die Fassade und in Innenräume und Keller. Mit Tierporträts und Tipps fürs Beobachten bietet es spannendes Wissen rund um die Natur in der Nähe.

Außerdem Tipps und Anleitungen: mit Bauplänen für Nisthilfen, Wissen fürs Bauen und Renovieren, Vorschläge fürs Entschärfen von Tierfallen.

Bequem bestellen:

- **→ direkt bei** www.science-shop.de
- **→ per E-Mail** info@science-shop.de
- **→ telefonisch** +49 6221 9126-841
- **→ per Fax** +49 711 7252-366
- **→ per Post** Postfach 810680 • 70523 Stuttgart

Für Bestellungen außerhalb Deutschlands und Österreichs berechnen wir € 3,50 Versandkosten. Alle Preise inkl. Umsatzsteuer. Preise unter Vorbehalt. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH

NEU

Carsten Könneker

WISSENSCHAFT KOMMUNIZIEREN

Ein Handbuch mit vielen praktischen Beispielen

2012, XII, 204 S. m. 30 SW- u. 50 Farbabb., kart., Wiley-VCH

Bestell-Nr. 3612

€ 24,90 (D), € 25,60 (A)

Dieses Buch ist eine unverzichtbare Hilfe für alle Naturwissenschaftler und Studenten, die ihre Arbeit gegenüber verschiedenen Zielgruppen besser kommunizieren wollen; seien dies Laien, Medien, Drittmittelgeber oder Kollegen anderer Fachbereiche. Das Buch erklärt die gute Praxis von Meldungen, Pressemeldungen, Artikeln, Kommentaren, Vorträgen, Drittmittelanträgen, Weblogs usw. anhand von vielen Beispielen aus der medialen Praxis.

Brian Clegg

WARUM TEE IM FLUGZEUG NICHT SCHMECKT UND WOLKEN NICHT VOM HIMMEL FALLEN

Eine Flugreise in die Welt des Wissens

2012, 238 S. m. zahlr. Abb., kart., Hanser

Bestell-Nr. 3518

€ 14,90 (D), € 15,40 (A)

Nirgendwo sonst begeben wir uns so sehr in die Hand der Wissenschaft wie im Flugzeug. Brian Clegg erklärt, wieso wir ohne Relativitätstheorie ins Meer stürzen würden, weshalb Vielfliegen eine Verjüngungskur und eine wohlschmeckende Tasse Tee im Flugzeug ein Ding der Unmöglichkeit ist. Und er lehrt uns, wieder über die Welt zu staunen, die wir vom Flugzeugfenster aus wahrnehmen. Die perfekte Urlaubslektüre und der ultimative Flugbegleiter.

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich

Klaus Schmeh

NICHT ZU KNACKEN

Von ungelösten Enigma-Codes zu den Briefen des Zodiac-Killers

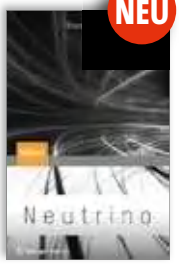
2012, 224 S. m. Abb., geb., Hanser Wirtschaft Wissen Weltgeschehen

Bestell-Nr. 3519

€ 18,90 (D), € 19,50 (A)

Die meisten Rätsel der Kryptologie sind heute gelöst – jedoch nicht alle. Der Kryptologie-Experte Klaus Schmeh hat die bedeutendsten ungeknackten Codes der Verschlüsselungsgeschichte zusammengetragen. In abenteuerlichen Geschichten schildert er die vergeblichen Bemühungen, die Botschaften zu dechiffrieren. Dabei begegnet er wagemutigen Charakteren mit genialen Ideen und präsentiert auch eigene Lösungsvorschläge.

NEU



Frank Close

NEUTRINO

2012, 256 S. m. 11 Abb., geb., Spektrum

Bestell-Nr. 3546

€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Über ein rätselhaftes Teilchen und seine wachsende Bedeutung für die Astrophysik

Der Autor schildert in diesem spannenden kleinen Buch nicht nur die ersten theoretischen Hinweise auf die Existenz solcher Teilchen, sondern auch den langen Kampf, jene Neutrinos zu »fangen« und ihre Natur zu verstehen.

Werner Kinnebrock

WAS MACHT DIE ZEIT, WENN SIE VERGEHT?

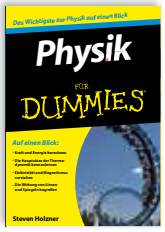
Wie die Wissenschaft die Zeit erklärt

2012, 160 S. mit 4 Abb. u. 2 Tab., kart., Beck

Bestell-Nr. 3531

€ 12,95 (D), € 13,40 (A)

»Was macht die Zeit, wenn sie vergeht?« Diese Frage stellte der Physiker Albert Einstein dem Mathematiker Kurt Gödel. Für Werner Kinnebrock, selbst Mathematiker, war sie der Anlass, ein wunderbar verständliches Buch über dieses faszinierende Phänomen zu schreiben.



Steven Holzner

PHYSIK KOMPAKT FÜR DUMMIES

Ein Grundkurs

2012, 224 S., kart., Wiley-VCH

Bestell-Nr. 3548

€ 10,– (D), € 10,30 (A)

Dieses Büchlein hilft Ihnen, wenn Sie sich einen schnellen Überblick über die Physik verschaffen wollen. Steven Holzner erklärt leicht verständlich, was Sie über Kräfte und Bewegungen, Energie, Wärme, Licht, elektrische Felder und Kernphysik unbedingt wissen sollten.

Ingrid Hilgert, Joachim Hilgert

MATHEMATIK – EIN REISEFÜHRER

2012, VII, 273 S. m. Abb., kart., Spektrum

Bestell-Nr. 3524

€ 24,95 (D), € 25,70 (A)

Dieses Buch versteht sich als Reiseführer in das Land der Mathematik. Es informiert unter anderem über die Regionen dieses Landes (Algebra, Geometrie, Analysis, Stochastik, ...), über seine Geschichte, bedeutende Krisen und Entwicklungslinien, Beziehung zu benachbarten Gebieten, Kultur, Gepflogenheiten und seine Bewohner, die Mathematiker.

Schnäppchen

Werner Bils

BIOLOGISCHES WISSEN IN FRAGE UND ANTWORT, 4 BÄNDE MIT CD-ROM

899 Aufgaben und Lösungen zu Zoologie und Botanik, Zellbiologie und Genetik, Evolution, Ökologie und Verhalten, Humanbiologie und Tierphysiologie

2012, 1056 S. m. zahlr. farb. Abb., kart., Quelle & Meyer

Bestell-Nr. 3619 Früher € 79,80,

jetzt nur € 39,95 (D), € 41,10 (A)

Die Vermittlung biologischen Wissens ist sowohl an allgemeinbildenden Schulen als auch in außerschulischen Bildungseinrichtungen eine komplexe und daher schwierige Aufgabe. Aber was ist mit der Überprüfung des erlernten Stoffes? Welche Fragen sollen sinnvoller Weise gestellt werden? Woher nimmt man diese und, vor allem, die richtigen Antworten zur Kontrolle? Ganz einfach: aus der vierbändigen Reihe Biologisches Wissen in Frage und Antwort!

Von Peter Schütt, Hans J. Schuck, Bernd Stimm u. a.

LEXIKON DER BAUM- UND STRAUCHARTEN

Das Standardwerk der Forstbotanik

2011, 581 S. m. zahlr. Farb- u. S-W-Abb., kart., Originalverlag: Ecomed, Nikol

Bestell-Nr. 3481

früher € 101,24, jetzt nur € 9,99 (D), € 10,30 (A)

Das Lexikon bietet die botanischen Grundlagen und einen umfassenden Einblick in die Biologie der Holzpflanzen und des »Ökosystems Wald«. Mit Angaben zu natürlichen Arealen, Standortansprüchen, Wuchsleistungen und Art der wirtschaftlichen Nutzung, Gattungen, Familien, Ordnungen, Baumkrankheiten.

Helmut Genaust

ETYMOLOGISCHES WÖRTERBUCH DER BOTANISCHEN PFLANZENNAMEN

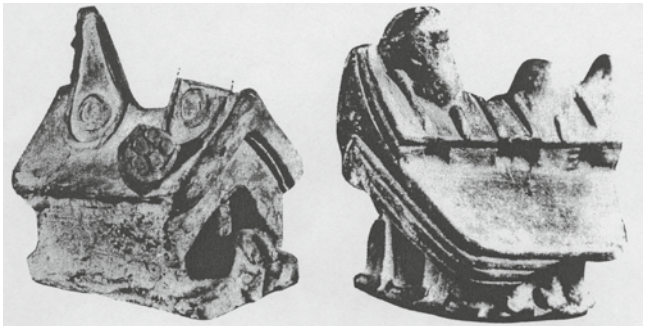
2012, 704 S., geb., Lizenz: Birkhäuser, geb., Nikol

Bestell-Nr. 3541 Früher € 148,–,

jetzt nur € 9,99 (D), € 10,30 (A)

Das Buch vermittelt das Wissen über die Etymologie botanischer Pflanzennamen, also die Aufklärung über die Herkunft und Geschichte der wissenschaftlichen Gattungs- und Artnamen (einschließlich Bakterien, Algen, Pilzen, Moosen und Flechten) und gibt einen faszinierenden Einblick in die Geschichte der mannigfachen Beziehungen zwischen Pflanze und Mensch.

Für Bestellungen außerhalb Deutschlands und Österreichs berechnen wir € 3,50 Versandkosten. Alle Preise inkl. Umsatzsteuer. Preise unter Vorbehalt. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH



Tonmodelle aus Ekuador – nach asiatischem Vorbild?

East meets West

»Bei Ausgrabungen, die kürzlich an der Küste der ecuadorianischen Provinz Manabi erfolgten, wurde eine neue Kulturabfolge aufgefunden. Eine dieser Phasen, Bahia I, enthält eine Reihe von Gegenständen, die einmalig in der neuen Welt sind. In erster Linie sind hier kleine Tonplastiken von Häusern mit eingesatteltem Dach und hohen spitzen Giebeln zu nennen, deren nächste Parallelen in Südostasien, Indonesien und der Südsee auftreten. Die Bahia-I-Phase, die zwischen 300 v. und 500 n. Chr. angesetzt wird, fällt mit einer Zeit großer Expansionen in Süd- und Ostasien zusammen, in denen ein reger Schiffsverkehr herrschte.« Die Umschau in Wissenschaft und Technik 11, 1962, S. 328

Verständiger Schuhkarton

»Ein neuartiges elektronisches Gerät, das den Sinn gesprochener Worte ›versteht‹, wurde von der International Business Machines Corporation (IBM) vorgeführt. Wegen seiner Ausmaße erhielt es die Bezeichnung ›Shoebox‹ (Schuhkarton). Es handelt sich vorerst noch um ein Experimentiergerät, das als Vorläufer von elektronischen Maschinen betrachtet werden kann, die gesprochene Befehle ausführen.« Automatik 6, 1962, S. 246

Radio im Bauch

»In den USA wurde eine Miniatur-Radiosonde erfunden, die vom Patienten verschluckt wird und Messergebnisse aus Magen und Darm auf ein Empfangsgerät überträgt. Der Elektronen-Ingenieur Dr. Wladimir K. Zworykin und der Internist Dr. John T. Farrar vom Rockfeller Center in Neuyork haben ein solches Gerät entwickelt, das einen Kurzwellensender mit Akkumulator enthält. Während einer Zeit von 15–24 Stunden übermittelt es Angaben über den Zustand des Verdauungskanals, insbesondere über die Bewegung der Flüssigkeiten und Druckverhältnisse.« Neuheiten und Erfindungen 320, 1962, S. 109

Schnecken verraten Atlantis

»Aus der lebenden Tierwelt der umliegenden Inseln und Länder zieht man Schlüsse auf die Lage des Kontinentes ›Atlantis‹, der Afrika mit Südamerika verband. So zeigt die Fauna der Azoren, Kanarischen und Kapverdischen Inseln, sowie von Madeira besonders auch bei den Weichtieren kontinentalen Ursprung an. Ganz neuerdings hat Dollfus Reste der Lungenschnecke Helix auf den Inseln gefunden, die mit den gleichalterigen marokkanischen vollständig identisch sind. Da bei allen Inselgruppen eine sedimentäre Unterlage festgestellt wurde, so kann es hiernach keinem Zweifel unterliegen, daß diese Inseln Teile eines versunkenen Festlandes sind.« Die Umschau in Wissenschaft und Technik 27, 1912, S. 574

Anonym abtanzen

»Eine kleine Auswahl von Maskentypen zeigen uns die Abbildungen, die allesamt dem Geheimbundwesen des westlichen Kamerun angehören. Die Stücke stellen den wesentlichsten Teil der Tanzausstattung dar, indem an die Ränder der Masken und Kopfaufsätze noch lange Behänge von Pflanzenfasern geknüpft werden, die den ganzen Oberkörper umhüllen, oder indem ganz bestimmte, meist netzartig geknüpfte Trikotanzüge zu den Masken hinzutreten. Der Träger des Anzugs muß unter allen Umständen für die Nichteingeweihten unerkennbar bleiben.« Kosmos, Heft 6, 1912, S. 214–217

Afrikanische Tanzmasken für Kameruns Geheimbünde

Auf einen Blick das richtige Glas

»Um möglichst rasch zu ermitteln, wie gross ungefähr der Refraktionsfehler des Patienten ist, habe ich 3 Brillengläser mit Stielen versehen, die sich um ein Scharnier drehen. Ohne das Instrument aus der Hand zu legen, kann ich diese 3 Gläser beliebig kombinieren. Für die Prüfung Kurzsichtiger habe ich –1,0, –2,0 und –4,0 Dioptr. gewählt. Derselbe Apparat für die Ermittlung der Uebersichtigkeit ist aus einem anders gefärbten Material hergestellt und enthält die Gläser +0,5, +1,0 und +2,0 Diptr.« Central-Zeitung für Optik und Mechanik 16, 1912, S. 187

AUS ZEITSCHRIFTEN DER FORSCHUNGSBIBLIOTHEK FÜR WISSENSCHAFT- UND TECHNIKGESCHICHTE DES DEUTSCHEN MUSEUMS

Elektronik mit Herz – der erste Schrittmacher

1958 wurde erstmals einem Menschen ein Herzschrittmacher implantiert. Um sie gegen die Körperflüssigkeiten elektrisch zu isolieren, haben seine Erfinder vom Stockholmer Karolinska Hospital die elektronischen Bauteile in Epoxidharz eingegossen. Das Modell (Bild rechts) ist derzeit im Deutschen Museum in der Ausstellung »Geliebte Technik der 1950er Jahre« zu sehen.

DEUTSCHES MUSEUM

Von Jörg Wipplinger

Der erste einem Patienten eingesetzte Herzschrittmacher hatte nicht zufällig die Form einer Dose für Schuhkreme – eine solche wurde als Formwerkzeug verwendet. Auch sonst sieht man dem Gerät an, dass es ein Prototyp war, entwickelt von den schwedischen Forschern Åke Senning und Rune Elmquist, gebaut in Elmquists Küche und bis dahin erst im Tierversuch getestet. Dennoch implantierte Senning es am 8. Oktober 1958 im Stockholmer Karolinska Hospital einem Patienten. Denn der damals 43-jährige Arne Larsson war bereit, das Risiko einzugehen – sein Leben hing bereits an einem seidenen Faden: Infolge einer Virusinfektion des Herzmuskels wurde er bis zu 30-mal am Tag reanimiert.

Damit das Herz Blut durch den Körper pumpt, müssen sich seine »Baugruppen«, die beiden Vorhöfe sowie die linke und rechte Hauptkammer, genau aufeinander abgestimmt zusammenziehen. Dafür sorgen zwei Gruppen spezialisierter Muskelzellen: Der Sinusknoten erzeugt periodisch eine elektrische Spannung, die sich über die Vorhöfe zum Atrioventrikularknoten (AV-Knoten) und von dort zu den Hauptkammern ausbreitet. Dieser Reiz regt die Muskeln zur Kontraktion an.

Die Infektion hatte Herzgewebe vernarben lassen und damit die Reizweiterleitung unterbrochen. Zu jener Zeit gab es bereits externe Schrittmacher, die über Elektroden das Organ mit elektrischen Reizen versorgten. Erst im Jahr zuvor hatte der amerikanische Elektrotechniker Earl Bakken ein Gerät mit Batteriebetrieb entwickelt, das an einem Schultergurt hing. Doch schränkten solche externen Systeme die Patienten in ihrem Alltag stark ein. Zudem bestand stets die Gefahr, dass Keime über die elektrische Zuleitung in den Körper gelangten und dass die auf das Herz aufgenähten Elektroden bei Bewegungen abrissen.

Dem Elektroingenieur Elmquist gelang es, die gesamte Elektronik zu miniaturisieren. Dafür verwendete er einen Schaltkreis aus zwei Transistoren – ein damals gerade einmal zehn Jahre altes Bauelement – und einem Kondensator. Die Energieversorgung besorgte eine Nickel-Kadmium-Batterie, die ebenfalls in den 1950er Jahren in Serie auf den Markt kam. Über eine Spule ließ sie sich drahtlos von außen wieder aufladen. Elmquist vergoss die gesamte Elektronik in der nämlichen Schuhkremedose in Epoxidharz. Bei einem Durchmesser von 5,5 Zentimetern und einer Dicke von 1,6 Zentimetern wog dieser Prototyp nur noch 200 Gramm. 72-mal pro Minute sollte er für 1,5 Millisekunden einen Impuls von zwei Volt liefern.

Die Operation verlief ohne Komplikationen: Der Chirurg öffnete den Brustkorb, nähte zwei Elektroden auf den Herzmuskel und platzierte den Schrittmacher zwischen die Sehnenplatten der Bauchwandmuskeln. Doch die Technik bereitete Probleme: Nach 15 bis 20 Minuten musste die Batterie aufgeladen werden, und das erste Gerät versagte nach wenigen Stunden. Ein zweiter Prototyp hielt länger, eine bis mehrere Wochen – die Angaben dazu variieren. Larsson diente freiwillig immer wieder als »Versuchskaninchen« für neue Generationen von Herzschrittmachern und unterstützte die Information von Patienten, um diesen die Angst vor der Technik zu nehmen. Er starb nach einem erfüllten Leben im Alter von 86 Jahren.

Heutzutage leben allein in Deutschland etwa eine Million Menschen mit einem Herzschrittmacher. Inzwischen passen die Geräte in eine Hauttasche unterhalb des Schlüsselbeins. Die Elektroden werden über eine Vene in die Herzkammer geführt und von innen am Herzmuskel befestigt. Nach durchschnittlich acht Jahren wird der Schrittmacher ausgetauscht, die Elektroden verbleiben. Die Operation dauert nicht einmal eine Stunde und benötigt keine Vollnarkose.

Jörg Wipplinger ist Wissenschaftsjournalist in Wien.

Ein neuer Weg zu langem Leben

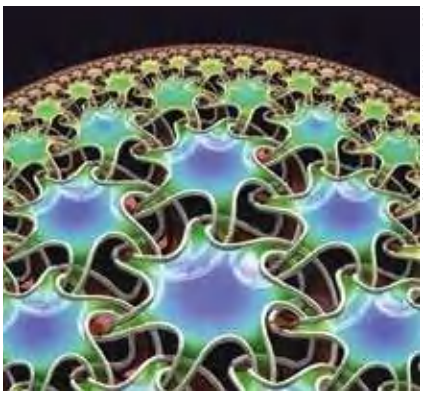
Jüngste Forschungen haben einen molekularen Mechanismus aufgedeckt, der das Altern verlangsamt. Medikamente, die ihn aktivieren, könnten uns nicht nur ein längeres Leben bescheren, sondern auch altertypische Gebrechen hinauszögern.

DREAMSTIME / ROBYN MACKENZIE

MINISTÈRE DE LA CULTURE ET DE LA COMMUNICATION (MCC), CENTRE NATIONAL DE PRÉHISTOIRE (CNP) PÉRIGUEUX

Das Ende der Höhlenbären

Prähistorische Künstler haben die Bärenriesen sogar noch gezeichnet, nachdem diese schon ausgestorben waren. Untersuchungen zeigen: Als sich der moderne Mensch in Europa verbreitete, war das Schicksal der Tiere wohl bereits besiegelt.



PAUL NYLANDER, WWW.BUGMAN123.COM

Horizontgeometrie

So wie die Maler der Renaissance »unendlich ferne Punkte« auf die Leinwand bannten, macht ein mathematischer Kunstgriff unendliche Räume endlich – auch die nichteuklidischen Räume der hyperbolischen Geometrie.

Elektronische Nasen

Mit trickreichen Sensoren und neuronalen Netzen imitieren Forscher den Geruchssinn von Säugetieren. Denn schon Spuren gasförmiger Substanzen könnten verraten, ob ein Gärungsprozess kippt, Fleisch noch frisch ist, gefährliche Gase aus Industrieanlagen austreten oder Sprengstoff in einer U-Bahn deponiert wurde.

Kernfusion einmal anders

Anstatt Wasserstoffpartikel durch Magnetfelder einzuschließen, versuchen manche Wissenschaftler, gefrorene Wasserstoffkügelchen mit Hochenergielasern zu bombardieren. Andreas J. Kemp, Physiker am größten Laser der Welt in Kalifornien, schildert, wie dereinst mit dieser »Trägheitsfusion« Energie gewonnen werden soll.

NEWSLETTER

Möchten Sie regelmäßig über die Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?

Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:
www.spektrum.com/newsletter

DIE VORTEILE EINES ABONNEMENTS

So vielfältig wie unser Magazin!

1 12 Ausgaben zum Preis von nur € 84,– inkl. Versand Inland (statt € 94,80 im Einzelkauf); für Schüler, Studenten und Azubis auf Nachweis sogar nur € 69,90

2 2 in 1: Sie erhalten nicht nur die Printausgabe, sondern können auch schon drei Tage vor dem Erstverkaufstag auf die Digitalausgabe zugreifen!

3 Kostenloser Zugriff auf das Onlineheftarchiv von **Spektrum der Wissenschaft** mit fast 9000 Artikeln

4 Bonusartikel und Gratisdownloads ausgesuchter Sonderhefte im Internet

5 Verbilligter Erwerb des Produkts des Monats

Produkt im Juni

»Magisches Kreditkartenetui«

6 **Zusätzlich für Ihre Abobestellung erhalten Sie ein Präsent Ihrer Wahl!**

Weitere Präsente finden Sie im Internet ...

Auf der CD-ROM von **Spektrum der Wissenschaft** finden Sie den kompletten Jahrgang 2011 als elektronische Datei inklusive aller Bilder und eine Datei mit allen Jahresinhaltsverzeichnissen sämtlicher Ausgaben von 1978 bis 2011 im Portable Document Format (PDF).

Diese schön gestaltete Tasse erfüllt beim Kaffee- oder Teegenuss einen doppelten Zweck: Sie genießen Ihr Lieblingsgetränk und erlernen gleichzeitig durch das Design der Tasse das Periodensystem der Elemente. Höhe: 105 mm; Inhalt: 460 ml

Das Buch »Die großen Fragen – Universum« behandelt grundlegende Probleme und Konzepte in der Wissenschaft, die Forscher und Denker seit jeher umtreiben.

Diese und zusätzliche Aboangebote wie **Geschenkabo**, **Miniabo** oder **Leser-werben-Leser-Abos** finden Sie unter:

www.spektrum.de/abo

Spektrum DER WISSENSCHAFT
WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

online: spektrum.de/abo
E-Mail: service@spektrum.com
Tel.: 06221 9126-743
Fax: 06221 9126-751
mit der Bestellkarte anbei

Weniger Neben.
Mehr Wirkung.

Mehr Lebensqualität durch Personalisierte Medizin von Roche.

Jeder Mensch ist anders – auch genetisch. Deshalb setzen wir auf Personalisierte Medizin: Unsere Bereiche Pharma und Diagnostics arbeiten gemeinsam an Tests und Wirkstoffen, um Therapien besser auf die Bedürfnisse von Patienten abzustimmen.

Unsere Innovationen helfen Millionen Menschen, indem sie Leid lindern und Lebensqualität verbessern. Wir geben Hoffnung.

www.roche.de

Roche

Innovation für die Gesundheit

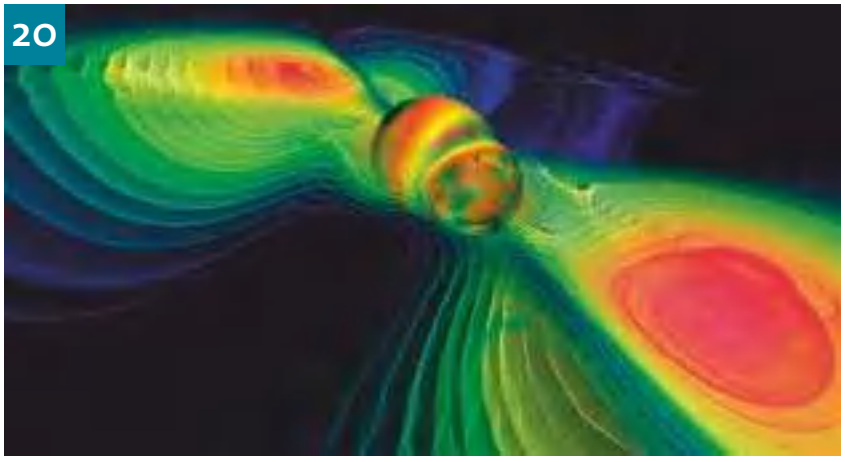
Neue Fenster zum Kosmos

Astroteilchenphysik in Deutschland

KAT
Komitee für Astroteilchenphysik

HELMHOLTZ GEMEINSCHAFT
Allianz für Astroteilchenphysik

Inhalt



3 **Editorial**

4 **Das ganz Große und das ganz Kleine**
Astronomen nehmen das Universum in den Blick, Teilchenphysiker den Mikrokosmos – und haben doch dasselbe Ziel.

8 **Die Jagd nach der Dunklen Materie**
Die normale Materie segelt wie ein Schiff auf einem Ozean Dunkler Materie. Woraus besteht diese rätselhafte Substanz?

10 **Neutrinos – Geisterteilchen mit kosmischer Botschaft**
Da sie Materie fast spurlos durchdringen, bieten Neutrinos einzigartige Einsichten in grundlegende Vorgänge im Kosmos.

14 **Karte: Großanlagen der Astroteilchenphysik**

16 **Das Universum bei extremen Energien**
Mit riesigen Detektoren für energiereiche Teilchen werden völlig neue kosmische Landschaften sichtbar.

20 **Einsteins Vermächtnis**
Kilometerlange Interferometer sind Gravitationswellen auf der Spur. Der direkte Nachweis steht unmittelbar bevor.

22 **Astroteilchenphysik für alle**
Die Suche nach Antworten auf die Grundfragen der Natur begeistert Studierende ebenso wie das breite Publikum.

24 **Hightech und Anwendungen**
Zahlreiche Disziplinen – von der Medizintechnik bis zur Umweltforschung – profitieren von den innovativen Verfahren und Produkten der Astroteilchenphysik.

27 **Übersicht: Forschungsprojekte der Astroteilchenphysik mit deutscher Beteiligung**

27 **Impressum**

28 **Karte: Astroteilchenphysik-Zentren in Deutschland**

Dr. Christian Spiering,
Vorsitzender des Komitees
für Astroteilchenphysik

Liebe Leserinnen und Leser,

in dieser Broschüre berichten wir über die Astroteilchenphysik, ein junges Forschungsfeld im Schnittpunkt von Teilchenphysik, Astrophysik und Kosmologie. Wir möchten Ihnen eine spannende und dynamische Wissenschaftsrichtung vorstellen und Ihnen ein Gefühl für die starke Rolle Deutschlands in diesem Feld vermitteln. Und wir wünschen uns, dass dieses Heft ein wenig von der Begeisterung, die wir als Forscher verspüren, auf Sie überträgt.

Die Astroteilchenphysik lässt sich vielleicht am besten durch die wissenschaftlichen Fragen charakterisieren, die sie beantworten will:

- Wie entstand das Universum, und warum besteht es nur aus Materie und nicht zu gleichen Teilen aus Materie und Antimaterie?
- Woraus besteht die rätselhafte Dunkle Materie?
- Welche Rolle spielen Neutrinos für die Entwicklung des Universums?
- Was können wir mit Hilfe von Neutrinos über das Innere der Sonne und der Erde sowie über Sternexplosionen erfahren?
- Was ist der Ursprung der kosmischen Strahlung? Wie sieht die Landkarte des Universums bei höchsten Energien aus?
- Was können uns Gravitationswellen über kosmische Prozesse und über die Natur der Gravitationskraft sagen?

Bei der Suche nach Antworten sind wir in Teilbereichen schon ein gutes Stück vorangekommen. Zum Beispiel wurden Neutrinos von der Sonne und von einer weit entfernten Sternexplosion entdeckt – im Jahr 2002 gab es dafür sogar einen Nobelpreis. Bei anderen Fragen haben wir gute Gründe anzunehmen, dass wir von spektakulären Entdeckungen gar nicht mehr weit entfernt sind, etwa bei der Suche nach Gravitationswellen und nach der Dunklen Materie. Auch ist die Landkarte des Hochenergie-Universums mittlerweile nicht mehr völlig weiß. Da, wo wir die ersten Schritte in unbekanntes Territorium gesetzt haben, möchten wir jedoch dieses Gebiet schließlich vollständig erkunden. Dazu sind weit größere (und auch kostspieligere) Anlagen nötig. Über einige der großen Zukunftsprojekte berichten wir in diesem Heft.

Astroteilchenphysik in Deutschland wird in erster Linie durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), die Helmholtz-Gemeinschaft (HGF), die Max-Planck-Gesellschaft (MPG) und die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) finanziert, also durch Ihre Steuergelder. Ein Grund mehr, Ihnen zu schildern, wozu wir die Mittel verwenden. Grundlagenforschung und das Bestreben, die Natur zu verstehen, sind sicherlich die bestimmende Motivation der meisten Wissenschaftler, sich solchen Projekten zu widmen. Doch die neuen Erkenntnisse und die Entwicklung von neuer Hochtechnologie schaffen auch Fortschritt bei ganz praktischen Dingen, wie zum Beispiel für Umweltfragen oder medizinische Anwendungen. Davon können Sie sich auf den hinteren Heftseiten überzeugen. Zudem erfahren Sie, welche Rolle die Astroteilchenphysik für die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses spielt.

Herausgeber dieser Broschüre ist das Komitee für Astroteilchenphysik (KAT; siehe www.kat-astroteilchen.de), das aus neun gewählten Vertreterinnen und Vertretern des Felds besteht. Dieses Gremium koordiniert die Zusammenarbeit der Astroteilchenphysiker/-innen in Deutschland. Die Zusammenarbeit hat durch die im Jahr 2011 etablierte Helmholtz-Allianz für Astroteilchenphysik – kurz HAP – einen mächtigen Schub bekommen (siehe www.hap-astroteilchen.de und http://twitter.com/astrohap). Dafür erhalten die beiden größten Helmholtz-Institute auf unserem Gebiet (das Karlsruher Institut für Technologie KIT und das Deutsche Elektronensynchrotron DESY mit seinem Standort in Zeuthen bei Berlin), zusammen mit den assoziierten Universitäten, eine fünfjährige Zusatzförderung.

Bereits vor gut zehn Jahren hat das BMBF damit begonnen, eine eigene Förderlinie für die Astroteilchenphysik einzurichten, die als Verbundforschung bezeichnet wird. Den Universitätsgruppen eröffnete das die Möglichkeit, sich in Zusammenarbeit mit Helmholtz-Zentren oder Max-Planck-Instituten an längerfristigen großen Forschungsprojekten zu beteiligen und hierbei viele junge Leute an aktuellsten Problemen der Grundlagenforschung auszubilden. Die Zahl der Universitätsgruppen und ihrer Mitarbeiter ist seither rasant angestiegen, und ohne ihre frischen Ideen und Beiträge könnten viele Projekte gar nicht erst durchgeführt werden. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft ergänzt das Spektrum der Forschungsförderung insbesondere durch die Ermöglichung vieler kleinerer Projekte, die auf kürzerer Zeitskala durchgeführt werden.

Mit dem ALICE-Detektor am Large Hadron Collider in Genf zeichnen Forscher die Kollisionstrümmer von Bleiatomen auf, die mit annähernd Lichtgeschwindigkeit aufeinandergeschossen werden. Dabei wird der Zustand des Universums simuliert, der eine zehnmilliardstel Sekunde nach dem Urknall herrschte.

Das ganz Große und das ganz Kleine

Astronomen und Teilchenphysiker untersuchen eigentlich entgegengesetzte Extreme: die einen das Allergrößte, die anderen das Allerkleinste. Nachdem sie aber in immer größere Entfernungen vorstießen, haben sie erkannt, dass ihre Gebiete aufs Engste miteinander verbunden sind.

Astronomen wollen das unvorstellbar große Weltall ergründen, Physiker nehmen die Welt des Allerkleinsten unter die Lupe. Während die einen mit ihren Teleskopen Sterne, Galaxien und riesige Galaxienhaufen bis in Entfernungen von Milliarden Lichtjahren beobachten, untersuchen die anderen mit Teilchendetektoren die elementaren Bausteine unserer Welt und die Kräfte, die zwischen ihnen wirken.

Die Stufenleiter von den kleinsten bis zu den größten Dimensionen erstreckt sich dabei über 61 Größenordnungen: von 10^{-35} Metern, der so genannten Planck-Länge, unterhalb deren die bekannten physikalischen Gesetze nicht mehr anwendbar sind, bis hin zum Durchmesser des beobachtbaren Teils des Universums, 10^{26} Meter. Oder, wenn man es in Zeitmaßstäben ausdrücken will: von 10^{-43} Sekunden nach dem hypothetischen Punkt null des Urknalls bis zur Gegenwart, 13,7 Milliarden Jahre später. Auch 61 Größenordnungen!

Trotz dieser Schwindel erregenden Spannweite der Dimensionen hängen das ganz Große und das ganz Kleine eng miteinander zusammen. Die Geschichte des Kosmos und das kosmische Inventar lassen sich nicht ohne die Teilchenphysik erklären. Und irdische Experimentierstätten reichen nicht aus, die energiereichste kosmische Teilchenstrahlung zu erzeugen, die uns aus den Weiten des Weltalls erreicht. Wissenschaftler möchten das gesamte Universum als gigantisches Labor nutzen, um die kosmischen Beschleuniger zu verstehen, um die Gültigkeit grundlegender Gesetze der Physik zu überprüfen und um Regionen zu untersuchen, in denen Schwerkraft, Dichte und Temperatur extrem hoch sind – etwa dort, wo Sterne explodieren oder gar in sich zusammenfallen und dann ein Schwarzes Loch bilden.

Seit rund 80 Jahren ist bekannt, dass sich das Universum ausdehnt. Einst muss der

CERN / ANTONIO SABA

Der Stoff, aus dem wir Menschen sind

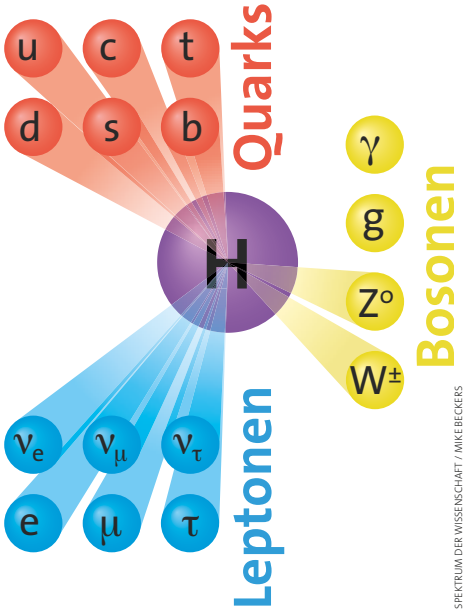
Im Urknall entstanden nur die leichten Elemente Wasserstoff und Helium sowie in geringen Mengen Lithium, Beryllium und Bor. Alle schwereren Elemente – also auch Kohlenstoff und Sauerstoff, Grundbausteine unseres Lebens – wurden erst später in Sternen produziert. Durch Supernovae wurden sie dann ins All geschleudert. Wir verdanken unsere Existenz dem Ende von Sternen!

Der Ursprung leichter Elemente im Urknall ist gut verstanden, die Elementsynthese in Sternen bis hin zum Eisen zumindest im Prinzip. Details zur Entstehung noch schwererer Elemente bis hin zum Uran sind dagegen weit weniger klar. Die Forscher gehen das Problem von mehreren Seiten an. Zunächst einmal verfeinern sie ihre Simulationen von Supernova-Explosionen. Zum anderen stellen sie die relevanten Kernprozesse an Schwerionen-Beschleunigern auf der Erde nach. Schließlich studieren sie mit Satellitendetektoren die Gammastrahlen, die beim Zerfall der frischgebackenen Elemente aus einem Supernova-Ausbruch emittiert werden. Solchen Fragen widmet sich das Gebiet der nuklearen Astrophysik.

Teil des Weltalls, den wir heute sehen, auf ein winziges Raumgebiet konzentriert und demzufolge extrem dicht und heiß gewesen sein. Von diesem Urknall ausgehend expandierte der Kosmos und kühlte sich ab. Dabei entstand nach und nach die heute bekannte Materie. Im mächtigsten Teilchenbeschleuniger der Welt, dem Large Hadron Collider (LHC) bei Genf, können Physiker den Zustand des Universums bei weniger als einer milliardstel Sekunde nach dem Urknall künstlich herstellen. Wenn sie zum Beispiel im ringförmigen Tunnel des Beschleunigers die schweren Kerne von Bleiatomen aufeinanderschießen, dann entsteht am Ort der Kollision ein heißes Plasma aus Quarks und Gluonen, wie es das Universum im Alter von billionstel und milliardstel Sekunden erfüllte. Die Physiker studieren das Feuerwerk sekundärer Teilchen, die bei den Kollisionen entstehen: Dadurch können sie nachvollziehen, wie sich eine hunderttausendstel Sekunde nach dem Urknall die Quarks und Gluonen zu Protonen und Neutronen verbanden, also zu jenen Teilchen, aus denen sich in einem nachfolgenden Schritt die Atomkerne bildeten.

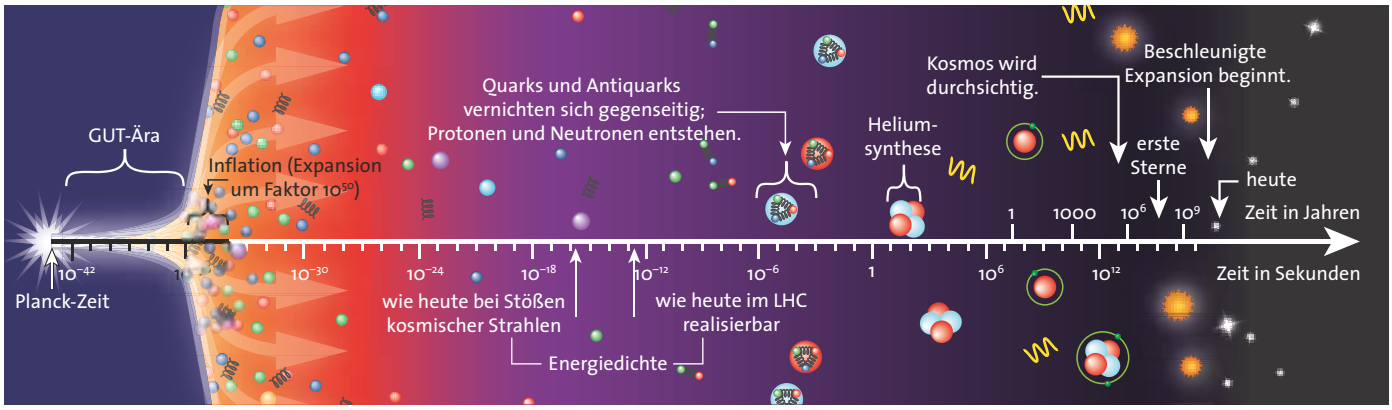
Die beiden gewichtigsten Gründe für den Bau des LHC betrafen jedoch die Theorie, mit der sich seit vier Jahrzehnten die Ergebnisse sämtlicher teilchenphysikalischen Experimente präzise erklären lassen: das Standardmodell der Teilchenphysik. Einerseits fehlt der Schlussstein dieses theoretischen Gebäudes noch, das viel zitierte Higgs-Teilchen. Die Experimente am LHC sollen es nachweisen. Andererseits glauben die Physiker aber, dass selbst das Standardmodell noch keine abschließende Beschreibung der Welt ist. Sie wollen deshalb einen Schritt darüber hinausgehen. Dabei treffen Kosmologie und Teilchenphysik erneut aufeinander. Wenn Elementarteilchen miteinander in Wechselwirkung treten, spielen drei der vier Grundkräfte im Universum eine Rolle. (Die vierte Grundkraft, die Schwerkraft oder Gravitation, macht sich nur über makroskopische Distanzen hinweg bemerkbar.) Theoretische Überlegungen sprechen dafür, dass diese drei Kräfte kurz nach dem Urknall gar nicht unterscheidbar, sondern noch zu einer Art Urkraft verschmolzen waren. Genau diesen Zustand soll eines Tages eine »Große Vereinheitlichte Theorie« (englisch: Grand Unified Theory, GUT) beschreiben und auch erklären, wie diese Urkraft schließlich doch in die Grundkräfte zerfiel.

Noch gibt es zahlreiche Kandidaten für eine solche Theorie jenseits des Standardmodells. Vieles spricht dafür, dass sie supersymmetrisch sein muss. Den so genannten SUSY-Theorien zufolge gibt es für jede Teilchensorte, die wir kennen, eine noch unbekannte Partnersorte. Die SUSY-Zwillinge sind einander in fast jeder Hinsicht gleich; sie unterscheiden sich nur in ihrer Masse und in ihrem Spin, also in ihrem inneren Drehimpuls.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MIKE BECKERS

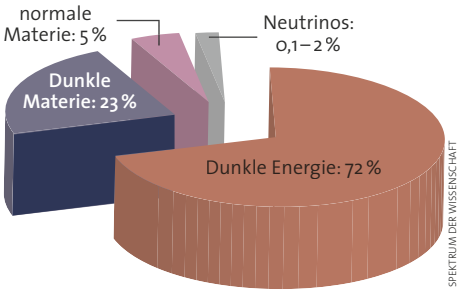
Das Standardmodell der Teilchenphysik: Sechs Quarks und sechs Leptonen bilden die Grundbausteine der Natur. Protonen zum Beispiel bestehen aus zwei u-Quarks und einem d-Quark, Neutronen aus zwei d-Quarks und einem u-Quark. Das bekannteste Lepton ist das Elektron (e). Von den geheimnisvollsten Leptonen, den Neutrinos (ν), gibt es drei Sorten: Elektron-, Myon- und Tau-Neutrinos. Die Kräfte zwischen den Teilchen werden durch den Austausch von Bosonen vermittelt: Photonen (γ) für die elektromagnetische Kraft, Gluonen (g) für die starke Kraft, W- und Z-Teilchen für die schwache Kraft. Das Higgs-Teilchen (H) ist dafür verantwortlich, dass W- und Z-Teilchen, Leptonen und Quarks eine Masse haben. Sein Fund würde das Standardmodell abschließen.



Die Entwicklung des Universums: Was in den ersten 10^{-43} Sekunden nach dem Urknall (Planck-Zeit) geschah, lässt sich physikalisch noch nicht beschreiben. In der darauf folgenden GUT-Ära (Ära der Großen Vereinheitlichten Theorien) waren drei der vier Fundamentalkräfte (elektromagnetische, starke und schwache Kraft) in einer »Urkraft« vereint. Von 10^{-36} bis 10^{-34} Sekunden blähte sich das Universum explosionsartig um 50 Größenordnungen auf (»Inflation«). Quarks und Antiquarks vernichteten sich nach etwa 10^{-6} Sekunden; die wenigen »überlebenden« Quarks klumpten zu Protonen und Neutronen zusammen. Die Kerne der leichtesten Elemente (vor allem Helium) bildeten sich etwa eine Minute später. Erst nach 300 000 Jahren war das Universum so kühl, dass die freien Elektronen von den Kernen eingefangen wurden, und es wurde durchsichtig. Sterne erzeugten nach einigen hundert Millionen Jahren schwere Elemente. Als das Universum halb so alt war wie heute, begann sich die Expansion zu beschleunigen: der erste Hinweis auf »Dunkle Energie«.

Seit zwei Jahrzehnten zieht keine Idee die Teilchenphysiker mehr in ihren Bann als die Supersymmetrie. Einer der Gründe für ihre Begeisterung: SUSY könnte endlich erklären, woraus die Dunkle Materie besteht, über die Astronomen seit den 1930er Jahren rätseln.

Schritt für Schritt haben die Astronomen nämlich herausgefunden, dass der größte Teil der Materie im Universum unsichtbar ist. In unseren Teleskopen sehen wir zwar Sterne und Galaxien und sogar den kosmischen Staub und das Gas, das vielerorts den Raum erfüllt. Doch es scheint dort noch etwas anderes zu geben, und davon sogar ziemlich viel: Dunkle Materie! Diese unsichtbare Materie macht sich durch ihre Gravitationskraft bemerkbar. Ohne ihre Anziehungskraft würden Galaxienhaufen auseinanderstieben. Ohne Dunkle Materie würden auch die Außenbezirke unserer Galaxis viel langsamer rotieren, als sie es tatsächlich tun. Die Astronomen schätzen, dass 90 Prozent unserer Galaxis aus Dunkler Materie bestehen.



Das kosmische Inventar

Dies ist aber noch nicht einmal das größte Rätsel, dem sich die Astronomen gegenübersehen. Vor 14 Jahren fanden sie heraus, dass der Löwenanteil des Universums bislang praktisch übersehen wurde. Zwei Arbeitsgruppen unter Leitung der Physiker Saul Perlmutter in den USA sowie Brian Schmidt und Adam Riess in Australien wollten 1998 messen, wie viel die Ausdehnung des Universums von ihrem ursprünglichen Schwung verliert. Paradoxerweise stellten sie aber genau das Gegenteil fest: Das Universum dehnt sich seit etwa sieben Milliarden Jahren mit stetig anwachsender Geschwindigkeit aus. Ein klarer Befund, für den die drei 2011 den Physik-Nobelpreis erhielten. Eine überzeugende Erklärung für den Effekt steht bisher noch aus. Allerdings, um mit Goethe zu sprechen: »Denn eben wo Begriffe fehlen, da stellt ein Wort zur rechten Zeit sich ein.« Hier heißt das Wort »Dunkle Energie«. Es scheint in der Tat so, als wenn eine unbekannte Energie das Universum wie einen Hefeteig auftreibt.

Wenn man die Dunkle Energie in die Bilanz miteinbezieht und nun die Rechnung für das gesamte Universum aufmacht, dann kommt man für die »normale« Materie nur noch auf magere 5 Prozent. Auf das Konto von Dunkler Materie gehen immerhin 23 Prozent. Der große Rest, nämlich 72 Prozent, muss aus Dunkler Energie bestehen.

Was die Dunkle Energie betrifft, so haben die Teilchenphysiker kaum etwas aus ihrem reichhaltigen Arsenal an exotischen Teilchen und Kräften anzubieten, was dieses Phänomen erklären könnte.

Dunkle Materie aus WIMPs?

Anders ist es bei der Suche nach Dunkler Materie. Sie ist aufs Engste mit der Suche nach neuen Teilchen verknüpft. Diese müssen eine Masse haben, weil sie sich ja gerade durch ihre Schwerkraft bemerkbar machen. Außerdem müssen sie elektrisch neutral sein, dürfen nur ganz schwach mit normaler Materie in Wechselwirkung treten und Licht weder aussenden noch reflektieren – sonst wären sie nicht »dunkel«. Neutrinos haben zwar einige der gewünschten Eigenschaften: Sie sind neutral und wechselwirken nur schwach mit Materie. Doch obwohl sie die häufigsten Teilchen im Universum sind, tragen sie höchstens zwei Prozent zu der Gesamtmasse bei. Gegenwärtig gelten darum WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles, schwach wechselwirkende massereiche Teilchen) als aussichtsreichste Kandidaten. Die WIMP-Masse dürfte irgendwo zwischen dem 10- und 1000-Fachen der Protonenmasse liegen. Genau solche Teilchen werden von den

SUSY-Theorien vorhergesagt. Weltweit sind Forscher daher mit immer präziseren Instrumenten auf der Suche nach ihnen (siehe Beitrag ab S. 8). Es sind aber auch weitere Teilchenkandidaten im Rennen, die unter anderem auf so kryptische Namen wie Axion, Q-Ball oder WIMPzilla getauft wurden.

WIMPs müssten sich, ebenso wie Neutrinos, auf Grund ihrer schwachen Wechselwirkung sehr früh vom Rest der Materie »entkoppelt«, also praktisch nicht mehr mit ihr reagiert haben. Dazu musste die Dichte der Urmaterie einen gewissen Wert unterschritten haben, und dieser Zeitpunkt setzte für WIMPs bei etwa 10^{-10} Sekunden ein, für Neutrinos bei etwa einer hundertstel Sekunde.

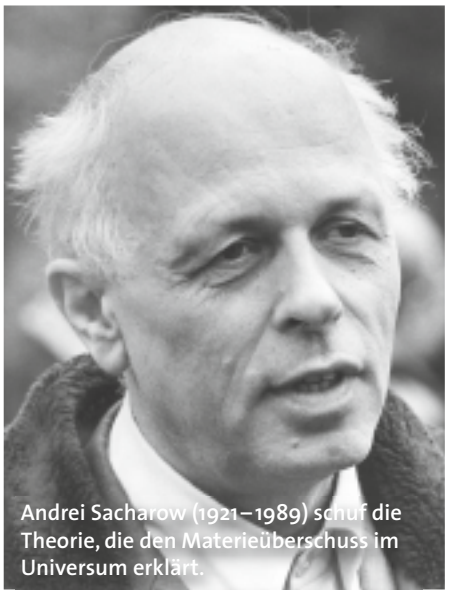
Wo ist die Antimaterie?

Im Jahr 1930 vermutete Paul Dirac, ein Physiker an der University of Cambridge in England, dass zu jedem Teilchen ein so genanntes Antiteilchen existieren müsse. Es würde genau dieselbe Masse haben, aber die entgegengesetzte Ladung. Tatsächlich: Zwei Jahre später wurde das Positron entdeckt – das positiv geladene Antiteilchen des negativ geladenen Elektrons. Mittlerweile kennt man die Antiteilchen von praktisch jedem Elementarteilchen. Sogar ganze Antiatome haben Forscher schon hergestellt. Erstmals gelang dies 1995 am europäischen Teilchenforschungszentrum CERN, das auch die Heimat des LHC ist. In diesen Atomen kreist nicht ein Elektron um ein Proton, sondern ein Positron um ein Antiproton.

Die Naturgesetze behandeln Materie und Antimaterie gleich. Darum müsste nach dem Urknall eigentlich genauso viel Materie wie Antimaterie vorhanden gewesen sein. Aber bis jetzt hat man trotz aller Anstrengungen keine nennenswerten Mengen von Antimaterie im Weltraum gefunden. Gegenwärtig erforscht das Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) auf der Internationalen Raumstation (ISS) die wenigen Antiteilchen, die vorwiegend in Reaktionen der kosmischen Strahlung entstehen.

Wo ist die Antimaterie also geblieben? Andrei Sacharow (1921–1989), weithin bekannt als Vater der sowjetischen Wasserstoffbombe sowie als späterer Bürgerrechtler und Friedensnobelpreisträger, fand 1967 erstmals eine mögliche Antwort. Sacharow nahm an, dass im Universum anfangs Materie und Antimaterie in gleichen Mengen vorhanden waren. Durch eine winzige Verletzung der Teilchen-Antiteilchen-Symmetrie entwickelte sich dieser Anfangszustand in einen Zustand, bei dem eine Winzigkeit mehr Materie vorhanden war. Während sich das Universum ausdehnte und dabei abkühlte, trafen Materie und Antimaterie aufeinander und zerstrahlten in pure Energie. Übrig blieb nur der kleine Materieüberschuss. Dieser, so Sacharow, sei der Stoff, aus dem wir gemacht sind: Protonen, Neutronen, Elektronen.

Wie es zu der Symmetriebrechung gekommen sein könnte, wird noch untersucht. Eine wichtige Rolle haben möglicherweise

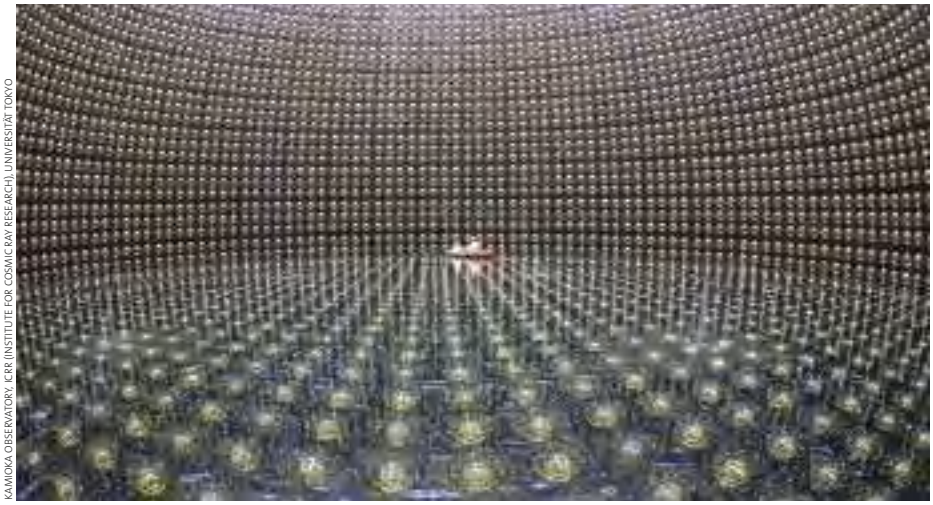


ULLSTEIN BILD

Andrei Sacharow (1921–1989) schuf die Theorie, die den Materieüberschuss im Universum erklärt.

Neutrinos gespielt (siehe Beitrag ab S. 10). Aber auch Protonen bieten eine denkbare Erklärung. Sacharow erkannte, dass seine Erklärung nur funktionert, wenn Protonen, die Grundbausteine des Kosmos, nicht ewig existieren, sondern eines Tages zerfallen. Genau dies sagen auch die bisherigen Ansätze für eine Große Vereinheitlichte Theorie vorher. Allerdings soll die Halbwertszeit des Zerfalls mindestens 10^{31} Jahre betragen – was 10^{21}-mal länger wäre als das bisherige Alter des Universums. Anders gesagt: Protonen zerfallen extrem selten. Will man messen, wie stabil Protonen sind, muss man also sehr viele davon während einer sehr langen Zeit beobachten. Außerdem müssen sich die Apparaturen sehr tief unter der Erde befinden, um sie von der kosmischen Strahlung abzuschirmen. Die nämlich zeigt sich als störender Effekt in den Messergebnissen.

Solche Experimente führen Forscher tatsächlich durch. Im japanischen Detektor Super-Kamiokande werden 50 000 Tonnen Wasser, die 10^{33} Protonen enthalten, permanent mit Detektoren überwacht. Diese müssten etwa 100 Zerfälle pro Jahr beobachten. Bis jetzt sind die Physiker allerdings noch nicht fündig geworden, sondern haben lediglich die untere Grenze für die Lebensdauer des Protons auf stattliche 10^{34} Jahre hochgeschraubt. Weltweit arbeitet man daher an noch größeren und empfindlicheren Detektoren. Einige SUSY-Theorien sagen nämlich eine Halbwertszeit von 10^{35} Jahren voraus. Hätten sie Recht, dann läge eine Jahrhundertentdeckung in Reichweite.



KAMIOKA OBSERVATORY, ICRR (INSTITUTE FOR COSMIC RAY RESEARCH), UNIVERSITÄT TOKYO

Der Superkamiokande-Detektor in einer japanischen Zinkmine: 11 000 an den Wänden befestigte Sensoren fahnden nach Lichtblitzen, die in 50 000 Tonnen hochreinem Wasser durch Protonzerfälle oder durch Neutrinoreaktionen erzeugt werden.

Die Jagd nach der Dunklen Materie

Die normale Materie ist wie ein Schiff, das auf einem Ozean von Dunkler Materie segelt. Noch ist unklar, woraus diese Substanz besteht. Eine neue Generation hochempfindlicher Detektoren könnte in den nächsten Jahren das Rätsel lösen.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MIKE BECKERS, NACH: HAP / ASTRID CHANTELAUZE

Wir glauben heute, dass gewöhnliche Atome, wie wir sie aus unseren Schulbüchern kennen, nur fünf Prozent des kosmischen Inventars ausmachen. Weitere 23 Prozent entfallen auf die geheimnisvolle Dunkle Materie, die für Teleskope unsichtbar ist, weil sie Licht weder aussendet noch reflektiert. Dunkle Materie macht sich nur durch ihre Gravitationswirkung auf die sichtbare gewöhnliche Materie bemerkbar.

Woraus könnte diese rätselhafte Substanz bestehen? Aus einem unbekannten Teilchen? Wie im vorigen Kapitel erwähnt, haben Physiker eine Reihe von Kandidaten anzubieten. Gegenwärtig favorisiert werden die WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles, schwach wechselwirkende massereiche Teilchen). Doch wie lassen sie sich nachweisen? Wie können wir das Unsichtbare sichtbar machen? Dazu gibt es drei Strategien:

Die Kombination verschiedener Suchstrategien bringt Physiker auf die Spur der Dunklen Materie

■ **Direkte Methode:** Man weist die Signale nach, die entstehen, wenn ein WIMP auf einen Atomkern trifft und ihn leicht anschubst. WIMPs reagieren jedoch ähnlich selten wie Neutrinos, außerdem sind die Signale winzig. Darum befinden sich die Detektoren tief unter der Erde, wo die kosmische Strahlung als Störquelle weit gehend ausgeschlossen ist. Zusätzlich muss die radioaktive Strahlung des umgebenden Gesteins penibel abgeschirmt werden, weil sie WIMP-Signale vortäuschen könnte. Auch die zum Detektorbau verwendeten Materialien müssen höchste Reinheit haben. Ein einziger Fingerabdruck auf einem Sensor würde alles zunichtemachen.

■ **Indirekte Methode:** Treffen irgendwo im Weltraum WIMPs aufeinander, vernichten sie sich gegenseitig. Dabei entstehen leichtere Endprodukte wie Neutrinos, Gammastrahlen oder Antiteilchen, die wir als »Marker« mit unseren Detektoren nachweisen können. Solche Zusammenstöße von WIMPs geschehen vermutlich dort besonders häufig, wo die Schwerkraft im Lauf der Jahrmilliarden viele WIMPs eingesammelt hat – beispielsweise im Zentrum der Sonne oder im Zentralbereich der Milchstraße. Einen der Detektoren, die solche Teilchen nachweisen könnten, hat der Spaceshuttle Endeavour am 16. Mai 2011 bei seinem letzten Flug auf die Internationale Raumstation gebracht. Das Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) untersucht dort nicht nur die Zusammensetzung der kosmischen Teilchen, die auf den Detektor treffen, sondern hält auch nach Antiteilchen Ausschau, die bei der Zerstrahlung von WIMPs entstehen.

■ **Künstliche Erzeugung:** Der Theorie zufolge bilden sich supersymmetrische WIMPs auch dann, wenn im Large Hadron Collider (LHC) bei Genf Protonen mit höchster Energie aufeinandergeschossen werden.

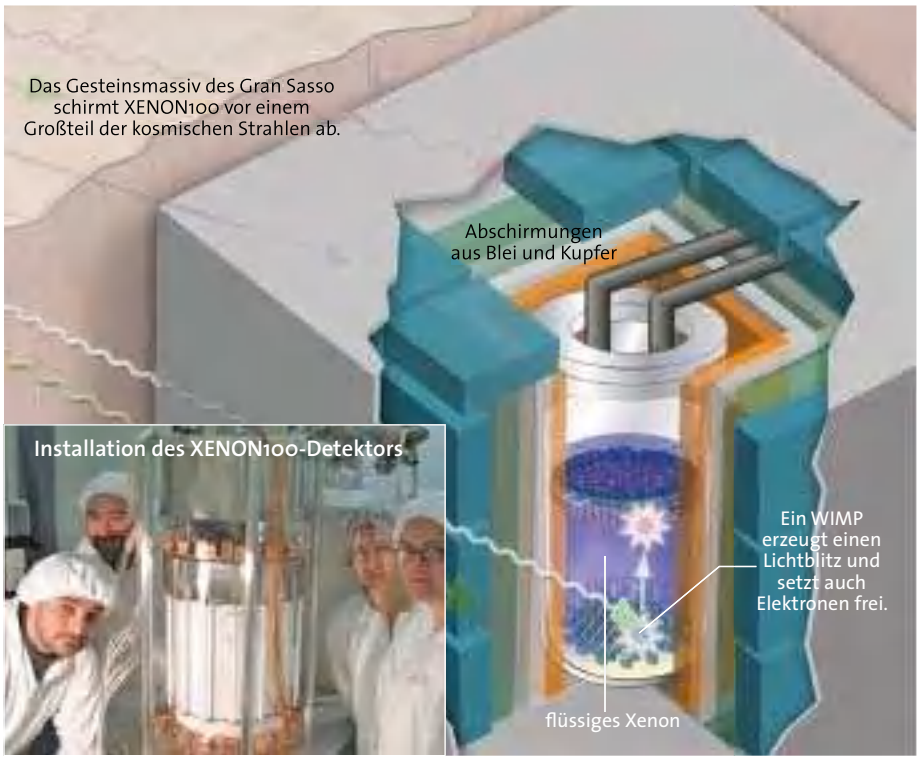
Endgültige Klarheit über den Charakter der Dunklen Materie erhoffen sich die Physiker von der Kombination aller drei Methoden.

Direkte Suche in Untergrundlabors

Europas größtes unterirdisches Labor befindet sich in den Abruzzen, 1500 Meter unter dem Gran-Sasso-Massiv. Dort sucht eine italienische Gruppe seit 14 Jahren mit ihrem Detektor DAMA (DArk MAtter) nach WIMPs. Sie stellte fest, dass die in hochreinen Kristallen aus Natriumjodid registrierten Lichtsignale ihre Häufigkeit im Jahresrhythmus verändern: etwas mehr im Sommer, etwas weniger im Winter. Das ist genau das, was man für WIMP-Reaktionen erwartet. Denn die Erde rotiert um die Sonne und verändert damit im Jahresrhythmus ihre Relativgeschwindigkeit zu dem »Ozean« aus Dunkler Materie, in dem unsere Galaxis schwimmt. Ist die erste Beute also schon im Netz?

Vielleicht. Vielleicht auch nicht. Denn so spannend dieses Ergebnis ist – es ist kaum zu vereinen mit den Negativresultaten anderer Detektoren, die mit alternativen Methoden inzwischen weit empfindlicher geworden sind als DAMA.

Die Empfindlichkeit der Experimente zur Suche nach Dunkler Materie hat sich in den letzten fünf Jahren etwa verdreißigfacht. Am weitesten ist dabei eine Anordnung vorgeprescht, bei der das WIMP über einen kleinen Lichtblitz nachgewiesen wird, der bei seinem Aufprall auf flüssiges Xenon entsteht. Zusätzlich werden durch Ionisation auch Elektronen freigesetzt. Aus der Kombination der beiden Messwerte – Licht



NATIONAL SCIENCE FOUNDATION (NSF) / ZINA DERETSKY, KLEINES FOTO, XENON COLLABORATION / ELENA APRILE

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PHYSIK / RAFAEL F. LANG

Im CRESST-Experiment werden Detektoren aus hochreinen Kristallen eingesetzt.

und Ladung – kann man weit besser als bei DAMA (das nur Licht misst) echte WIMP-Signale von vermeintlichen unterscheiden. Als Material werden 100 Kilogramm flüssiges Xenon genutzt. Daher heißt das Experiment, das sich ebenfalls im Gran-Sasso-Labor befindet, XENON100.

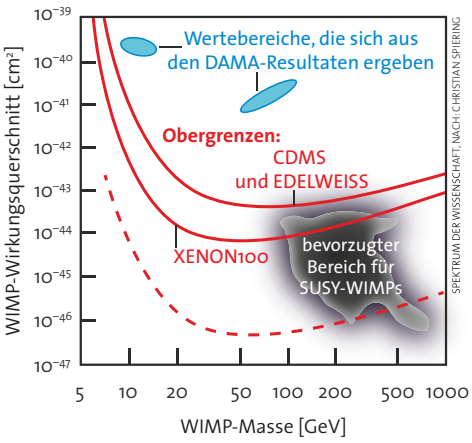
Bislang hat XENON100 noch keine WIMP-Kandidaten registriert. Der Detektor stößt aber inzwischen mit seinen Ausschlussgrenzen in jene Region vor, die von den Supersymmetrie-Theorien für WIMPs vorhergesagt wird. Eine Entdeckung kann also ganz nahe sein! Das XENON-Team arbeitet bereits an einem zehnmal so großen Detektor namens XENON1T (für: eine Tonne), der 2015 in Betrieb gehen soll. Deutsche Gruppen leisten dabei, nach ihren US-amerikanischen Kollegen, den größten Beitrag.

Einen anderen Weg als XENON schlagen die so genannten kryogenen Experimente zur WIMP-Suche ein. Dabei werden gewisse Kristalle bis fast auf den absoluten Temperaturnullpunkt abgekühlt – auf zehn Millikelvin, das sind minus 273,14 Grad Celsius. Dann sind die Atome in ihren Positionen regelrecht eingefroren. Stößt ein WIMP auf einen solchen tiefgekühlten Kristall, regt es ihn zu winzigen Schwingungen an, die sich mit empfindlichen Detektoren als Temperaturanstieg nachweisen lassen. Registriert man zwei verschiedene Messgrößen – den Temperatursprung zusammen mit einem Lichtblitz oder, alternativ, einem Ladungssignal –, sind WIMPs gut von vermeintlichen Signalen zu unterscheiden. Das CRESST-Experiment im Gran-Sasso-Labor weist Temperatur- und Lichtsignale in Kristallen aus Kalziumwolframat nach. Zwei weitere Detektoren, EDELWEISS in den französischen Alpen sowie ein US-amerikanisches Experiment, setzen dagegen auf den Nachweis von Temperatur- und Ladungssignalen in Germaniumkristallen. Deutsche Forscher sind sowohl an CRESST wie auch an EDELWEISS beteiligt.

Die Germaniumdetektoren wurden noch nicht fündig, CRESST dagegen hat zwei Dutzend Signale registriert, die verdächtig nach WIMP-Ereignissen aussehen und sich nicht recht durch andere Effekte erklären lassen. Mit einer verbesserten Anordnung will die CRESST-Gruppe die Unklarheiten ausräumen.

In Zukunft wollen jedoch CRESST und EDELWEISS an einem Strang ziehen. Die gemeinsame Detektormasse der beiden Experimente beträgt derzeit einige Dutzend Kilogramm. Ab 2015 wollen die Teams schrittweise den Ein-Tonnen-Detektor EURECA errichten (European Underground Rare Event Calorimeter Array). Andere Gruppen in Europa, den USA, Japan und China planen ebenfalls Anlagen von einer oder gar mehreren Tonnen Detektormasse.

Damit dürfte noch in diesem Jahrzehnt die Stunde der Wahrheit schlagen: Wenn WIMPs wirklich existieren, werden wir sie finden. Ansonsten wankt unser Theoriegebäude, und wir müssen neue Erklärungen für die geheimnisvolle Dunkle Materie finden. So oder so steht uns eine spannende Dekade bevor!



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT NACH: CHRISTIAN SPIERING

Die Reaktionswahrscheinlichkeit der WIMPs (»Wirkungsquerschnitt«, vertikale Achse) und ihre Masse (horizontale Achse) sind noch unbekannt. DAMA hat die Werte zwar schon eingegrenzt (blau); andere Experimente wie CDMS, EDELWEISS und XENON100 haben jedoch alle Parameterkombinationen ausgeschlossen – auch die von DAMA vorhergesagten –, die oberhalb der durchgezogenen Kurven liegen. Die neuen Ein-Tonnen-Detektoren werden bald auch den von SUSY-Modellen vorhergesagten Parameterbereich ausloten (gestrichelte Kurve).

Blick ins Innere des Neutrinodetektors BOREXINO im italienischen Gran-Sasso-Untergrundlabor

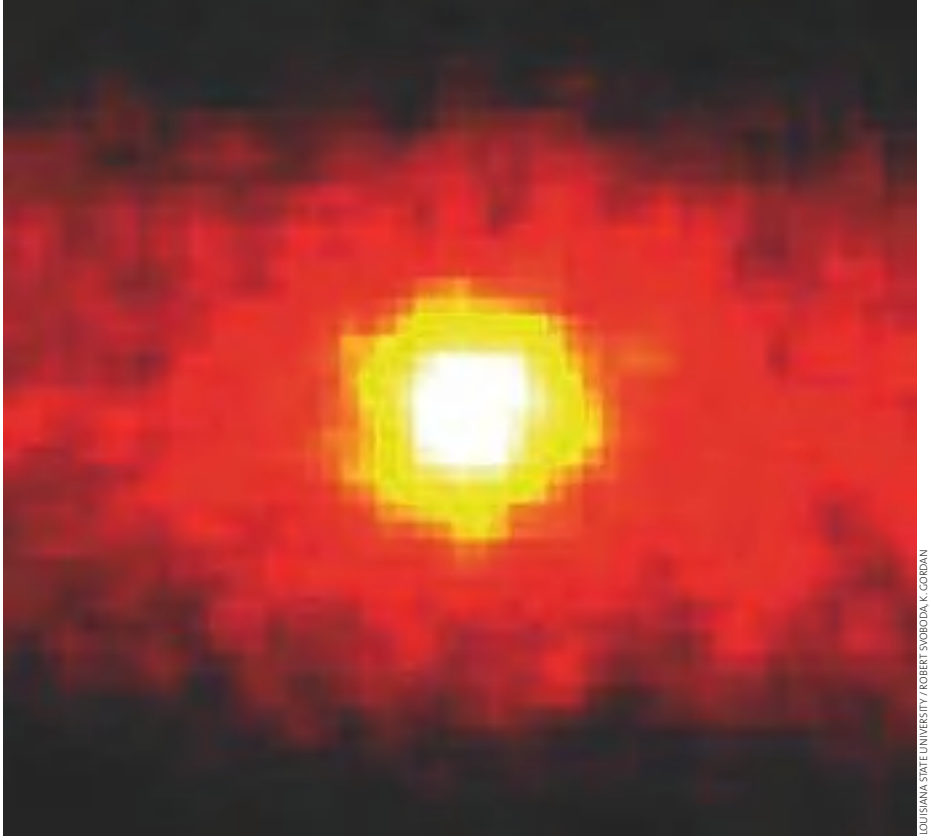
LNGS (LABORATORI NAZIONALI DEL GRAN SASSO) / V. STEIGER

Neutrinos – Geisterteilchen mit kosmischer Botschaft

Billionen von Neutrinos durchqueren in jeder Sekunde unbemerkt unseren Körper. Mit nahezu Lichtgeschwindigkeit rasen sie durch den Raum, ohne Spuren zu hinterlassen. Aber so geisterhaft diese Teilchen auch sein mögen: Sie stellen einen einzigartigen Schlüssel zu grundlegenden Fragen des Kosmos dar.

Die Geschichte der Neutrinos begann mit einem Überraschungswurf. Im Jahr 1930 sagte der Physiker und spätere Nobelpreisträger Wolfgang Pauli ihre Existenz voraus, bekannte aber gleichzeitig: »Ich habe etwas Schreckliches getan: Ich habe ein Teilchen vorausgesagt, das nicht nachgewiesen werden kann.« Atomphysiker waren beim radioaktiven Zerfall bestimmter Elemente auf eine Ungereimtheit gestoßen. Wenn ein Atomkern zerfiel, besaß jedes der Bruchstücke eine bestimmte Energie. Doch die Summe der Teilenergien war stets geringer als die Gesamtenergie des Ausgangskerns. Das war jedoch ein Ding der Unmöglichkeit, denn Energie kann nicht einfach verschwinden. Zur Lösung des Dilemmas vermutete Pauli, dass ein unsichtbares, bis dahin unbekanntes Teilchen – das Neutrino – diese fehlende Energie bei dem Zerfall davontrug.

Zum Glück irrte sich Pauli in der Annahme, Neutrinos seien nicht nachweisbar. In Kernreaktoren entstehen beim radioaktiven Zerfall sehr viele dieser Teilchen, die dann in die Umgebung hinausschießen. Der starke Neutrinofluss bot die Möglichkeit, zumindest einige wenige von ihnen aufzuspüren. Dieses Kunststück gelang 1956 am Kernreaktor Savannah River in den USA. Aus dem Fluss von 10^{24} Neutrinos löste ein knappes Dutzend ein Signal in dem Nachweisinstru-



LOUISIANA STATE UNIVERSITY / ROBERT SVOBODA, K. GORDAN

Die Sonne im »Licht« der Neutrinos. Über mehrere Jahre registrierten Forscher mit dem Superkamiokande-Detektor in Japan solare Neutrinos und zeichneten die Richtung ihrer Herkunft auf. Von der Erde aus gesehen liegt die Sonnenscheibe innerhalb eines Winkels von 0,5 Grad. Da die Winkelgenauigkeit für diese Neutrinos sehr gering ist, ist das Kamiokande-Bild der Sonne (weißer und gelber Bereich) über mehr als 20 Grad verschmiert. Die wichtige Information steckt allerdings nicht in der genauen Richtung, sondern in Anzahl und Energie der Neutrinos.

ment aus. Der US-amerikanische Forscher Frederick Reines erhielt für den Nachweis 1995 den Physik-Nobelpreis.

Heute wissen wir, dass es drei Neutrinosorten gibt: Elektron-, Myon- und Tau-Neutrinos. Sie sind die leichtesten bekannten Elementarteilchen. Wie groß ihre Massen genau sind, wissen Physiker nicht. Sie konnten nur ermitteln, dass sie weniger als vier Millionstel der Elektronenmasse betragen.

Obwohl Neutrinos kaum mit Materie reagieren, spielen sie eine wesentliche Rolle für die Entwicklung des Universums und für unsere eigene Existenz. Sekundenbruchteile nach dem Urknall trugen Neutrinos möglicherweise dazu bei, dass von dieser Explosion nicht nur reine Energie, sondern auch Materie übrig geblieben ist. Einige Sekunden später spielten sie eine wichtige Rolle bei der Entstehung der ersten, leichten Elemente. Und schließlich sorgen Neutrinos nach heutigem Wissen dafür, dass massereiche Sterne am Ende ihres Lebens als Supernovae explodieren. Dadurch werden schwere Elemente – wie Kohlenstoff, Stickstoff, Sauerstoff – in den Weltraum geschleudert, wo sie für die Entstehung von Planeten und Lebewesen zur Verfügung stehen. Ohne Supernovae könnte das Eisen, das im Innern von Sternen entsteht, niemals nach außen gelangen. Ohne Eisen wiederum gäbe es kein Hämoglobin, das für den Sauerstofftransport in unserem Blut unerlässlich ist.

CERN

Wolfgang Pauli (1900–1958) sagte 1930 die Existenz von Neutrinos voraus.

Besonders hervorgetan haben sich Neutrinos als kosmische Boten. Indem sie als einzige Teilchen ungehindert aus den heißen Zentralbereichen von Sternen nach außen dringen, liefern sie uns entscheidende Informationen über die dort ablaufende Synthese von chemischen Elementen.

Kosmische Botenteilchen

Die nächstgelegene Neutrinoquelle im Universum ist die Sonne. In ihrem Zentrum finden Kernreaktionen statt, bei denen enorme Mengen dieser Teilchen frei werden. In jeder Sekunde durchqueren auf der Erde etwa 60 Milliarden solare Neutrinos eine Fläche von der Größe eines Daumennagels. Dennoch stößt kaum ein Dutzend von ihnen mit einem Atom im Erdinnern zusammen. Der Rest fliegt ungestört durch unseren Planeten hindurch.

So paradox es klingt, aber gerade deshalb eignen sich Neutrinos als kosmische Boten. Sie können fast ungehindert die dicksten Materieschichten durchdringen und aus Regionen entweichen, in die wir nicht hineinschauen können – zum Beispiel aus dem Kern der Sonne. Lichtteilchen, die im Zentralbereich entstehen, prallen ständig auf Atome und benötigen deshalb mehr als 100 000 Jahre, bis sie an die Oberfläche gelangen. Neutrinos hingegen durchqueren dieselbe Strecke nahezu ungehindert in gut zwei Sekunden.

Der erste Nachweis von Sonnenneutrinos gelang Anfang der 1970er Jahre Raymond Davis vom Brookhaven National Laboratory. Allerdings maß Davis nur etwa ein Drittel der berechneten Neutrinorate. Dieser Befund ließ Zweifel sowohl an der Messung wie auch an dem Modell über die Energieerzeugung im Innern der Sonne aufkommen. Andere Experimente bestätigten jedoch Davis' Messungen, so dass man die Lösung des Rätsels in einer Neutrinoeigenschaft suchte.

Schon 1957 hatte Bruno Pontecorvo vom Institut für Kernforschung in Dubna (damalige Sowjetunion) angenommen, dass sich die unterschiedlichen Neutrinosorten ineinander umwandeln können. Physiker sprechen vom Oszillieren zwischen den unterschiedlichen Identitäten. Davis konnte mit seinem Detektor ausschließlich Elektron-Neutrinos nachweisen, die tatsächlich in großer Zahl im Zentrum der Sonne frei werden. Auf dem Weg zur Erde wandelt sich aber nach Pontecorvos Theorie der größte Teil

FOTO: ÁLEX MENZINSKY VOLLMUHT; DETEKTOR: LENA WORKING GROUP; MONTAGE: HAP/ASTRID CHANTELAUZE

LAGUNA im Größenvergleich mit der Münchner Frauenkirche. Der Detektor könnte mit einer fluoreszierenden Flüssigkeit, flüssigem Argon oder Wasser gefüllt sein. Die erste dieser Varianten ist im Bild links zu sehen. Sie würde tief unter der Erde in einer 100 Meter hohen Kaverne stehen.

von ihnen in die anderen beiden Sorten um. Und für diese war Davis' Detektor blind. Es sollte noch bis zum Jahr 2001 dauern, bis die Oszillationserklärung für das solare Neutrinodefizit hieb- und stichfest war und alle anderen Hypothesen ausgeschlossen werden konnten.

Raymond Davis erhielt 2002 den Physik-Nobelpreis zusammen mit Masatoshi Koshiba von der Tokai-Universität in Tokio, der mit seinem Kamiokande-Detektor ebenfalls solare Neutrinos gemessen hatte. Darüber hinaus war Koshiba jedoch noch eine spektakuläre Entdeckung gelungen: Am 23. Februar 1987 wies er mit Kamiokande zwölf Neutrinos nach, die bei der Explosion eines Sterns in der Großen Magellanschen Wolke frei geworden waren. Die Neutrinos dieser Supernova bestätigten eindrucksvoll die Vorstellungen über die Explosion von Sternen am Ende ihrer Entwicklung. Der 23. Februar 1987 wird daher häufig als die eigentliche Geburtsstunde der Neutrino-Astronomie angesehen.

Erforschung des Inneren der Sonne

Die solare Neutrino-Astronomie hat inzwischen eine Präzision erreicht, von der man vor 20 Jahren nur träumen konnte. Das gegenwärtig empfindlichste Experiment auf diesem Gebiet heißt BOREXINO. Herz dieser Anlage im italienischen Untergrundlabor Gran Sasso in den Abruzzen ist ein kugelförmiger Tank, der mit 300 000 Litern einer speziellen Flüssigkeit gefüllt ist. Stößt darin ein Neutrino mit einem Atom zusammen, so entsteht ein schwacher Lichtblitz, der von Lichtsensoren an den Tankwänden aufgezeichnet wird.

Mit BOREXINO lassen sich die Reaktionsvorgänge im Sonneninnern bis auf wenige Prozent genau überprüfen – und weil das quasi in Echtzeit möglich ist, könnten wir damit auch sehen, wenn plötzlich der Sonnenofen im Inneren schwächeln würde. Ferner konnten Physiker mit BOREXINO erstmals eindeutig Neutrinos nachweisen, die bei Kernzerfällen im Erdinnern entstehen. Dabei stellte sich heraus, dass diese natürlichen radioaktiven Zerfälle für etwa die Hälfte der Erdwärme verantwortlich sind.

Zurzeit planen europäische Physiker das Experiment LAGUNA (Large Apparatus for Grand Unification and Neutrino Astrophysics). Es soll 10- bis 20-mal größer sein als BOREXINO. Damit könnte es von einer Supernova in unserem Milchstraßensystem einige zehntausend Neutrinos registrieren – eine Goldgrube für die Astrophysik ebenso wie für die Teilchenphysik! Der Detektor könnte darüber hinaus mit zehnfach verbesserter Empfindlichkeit nach dem Protonzerfall suchen, den die Großen Vereinheitlichten Theorien vorhersagen.

LAGUNA würde auch den dünnen Neutrinonebel aufspüren, der von allen jemals explodierten Supernovae übrig geblieben sein muss und der Informationen über frühe Phasen des Universums enthält. Außerdem wäre es möglich, vom europäischen Beschleunigerzentrum CERN in Genf einen Neutrinostrahl auf LAGUNA zu lenken. Dabei könnte man grundlegende Eigenschaften der Teilchen untersuchen, die eng mit dem Ursprung des Universums zusammenhängen.

Hat das Neutrino eine Masse?

Bruno Pontecorvos Theorie der Neutrinooszillationen ist heute unbestritten. Man hat den Effekt für kosmische Neutrinos gemessen wie auch für Neutrinos aus Kernreaktoren und Teilchenbeschleunigern. Pontecorvo zufolge können jedoch Neutrinos nur oszillieren, wenn sie eine Masse haben. Leider sagen die Oszillationsbefunde nur etwas über die Differenz der drei Massen aus, nicht über die Massen selbst. Die Masse muss man aber kennen, wenn man abschätzen will, wie groß der Anteil der Neutrinos an der Masse der gesamten Materie im Weltall ist. Für Kosmologen ist dies eine ganz entscheidende Frage.

Es gibt jedoch Möglichkeiten, die absoluten Massen zu bestimmen. Dabei misst man die Energie der Elektronen aus dem radioaktiven Zerfall einer Substanz und bestimmt dadurch – wie zu Zeiten Paulis, nur viel präziser – die fehlende Energie. Daraus wiederum lässt sich die Neutrinomasse berechnen. Das bisher genaueste Experiment dieser Art lief an der Universität Mainz. Aus ihm ergab sich, dass die Masse der Elektron-Neutrinos weniger als zwei Elektronvolt beträgt. Das ist eine unter Teilchenphysikern gebräuchliche Masseneinheit, in der das Elektron eine Masse von 511 000 Elektronvolt besitzt.

Derzeit entsteht am Karlsruher Institut für Technologie das Instrument KATRIN (»Karlsruhe Tritium Neutrino«-Experiment). Mit einem riesigen Spektrometer wird KATRIN Elektronen aus dem Zerfall des radioaktiven Wasserstoffisotops Tritium mit zehnmal höherer Genauigkeit vermessen als seine Vorgänger. Wenn KATRIN 2014 anläuft, wird es Neutrinomassen bis herunter zu 0,2 Elektronvolt nachweisen können. Damit

deckt es den gesamten Massenbereich ab, der für Kosmologen interessant ist.

Eine der faszinierendsten Fragen wollen europäische Physiker mit ihrem Experiment GERDA (Germanium Detector Array) klären. Sie geht auf eine Theorie des italienischen Physikers Ettore Majorana von der Universität Neapel aus dem Jahr 1937 zurück. Majorana stellte damals die Hypothese auf, dass Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen sein könnten. Wenn Neutrinos Majorana-Teilchen wären, dann dürften sie neueren Theorien zufolge eine entscheidende Rolle dafür gespielt haben, dass sich im Urknall Materie und Antimaterie nicht vollständig gegenseitig vernichtet haben. Bei vollständiger Vernichtung gäbe es heute überhaupt keine Materie im Universum, sondern ausschließlich Strahlung. Es muss folglich einen kleinen Überschuss an Materie gegenüber der Antimaterie gegeben haben. Wie dieser Bruch der vollständigen Symmetrie damals zu Stande kam, ist eine der weitreichendsten Fragen sowohl der Teilchenphysik als auch der Kosmologie.

Lässt sich Majoranas Hypothese überprüfen? Die Antwort lautet: Ja. Es gibt nämlich einen radioaktiven Zerfallsprozess, der nur für Majorana-Neutrinos möglich ist, den so genannten neutrinolosen doppelten Beta-Zerfall. Der zweifelsfreie Nachweis dieses Prozesses würde nicht nur die Majorana-Natur des Neutrinos beweisen, sondern auch, dass es eine Masse hat und wie groß diese Masse ist.

Weltweit wird in den nächsten zwei bis vier Jahren ein halbes Dutzend Experimente einen möglichen ersten Hinweis auf diesen Zerfall überprüfen können, der vor knapp zehn Jahren von einem deutsch-russischen Team gemeldet wurde. Spitzenreiter ist hier das GERDA-Experiment. Es wurde unter der Leitung von deutschen Max-Planck- und Universitätsinstituten ebenfalls im Gran-Sasso-Labor gebaut und misst dort seit 2011 die Zerfälle von Germanium-76.

Mehr als ein halbes Jahrhundert nach ihrer Entdeckung haben die rätselhaften Neutrinos nichts an Faszination verloren – im Gegenteil. Mit verbesserten Experimenten tritt die Neutrinoforschung gerade in eine neue Phase ein. Für das kommende Jahrzehnt verspricht sie Antworten auf eine Reihe grundlegender Fragen, mit denen sie die gesamte Spannbreite von der subatomaren Welt bis hin zum gesamten Universum abschreitet – eine Entwicklung, von der wohl selbst unkonventionelle Denker wie Wolfgang Pauli oder Ettore Majorana nicht einmal träumen konnten.

KATRIN COLLABORATION

Mit dem KATRIN-Spektrometer wollen Forscher die Masse des Elektron-Neutrinos genauer als je zuvor vermessen.

KAI FREUND, UNIVERSITÄT TÜBINGEN

Der Detektor GERDA befindet sich in einem mit spezieller Folie ausgekleideten Wassertank, der Störsignale abschirmt.

PUBLIC DOMAIN

Ettore Majorana (1906–1938) postulierte, Neutrinos seien ihre eigenen Antiteilchen.

Großanlagen der Astroteilchen-physik

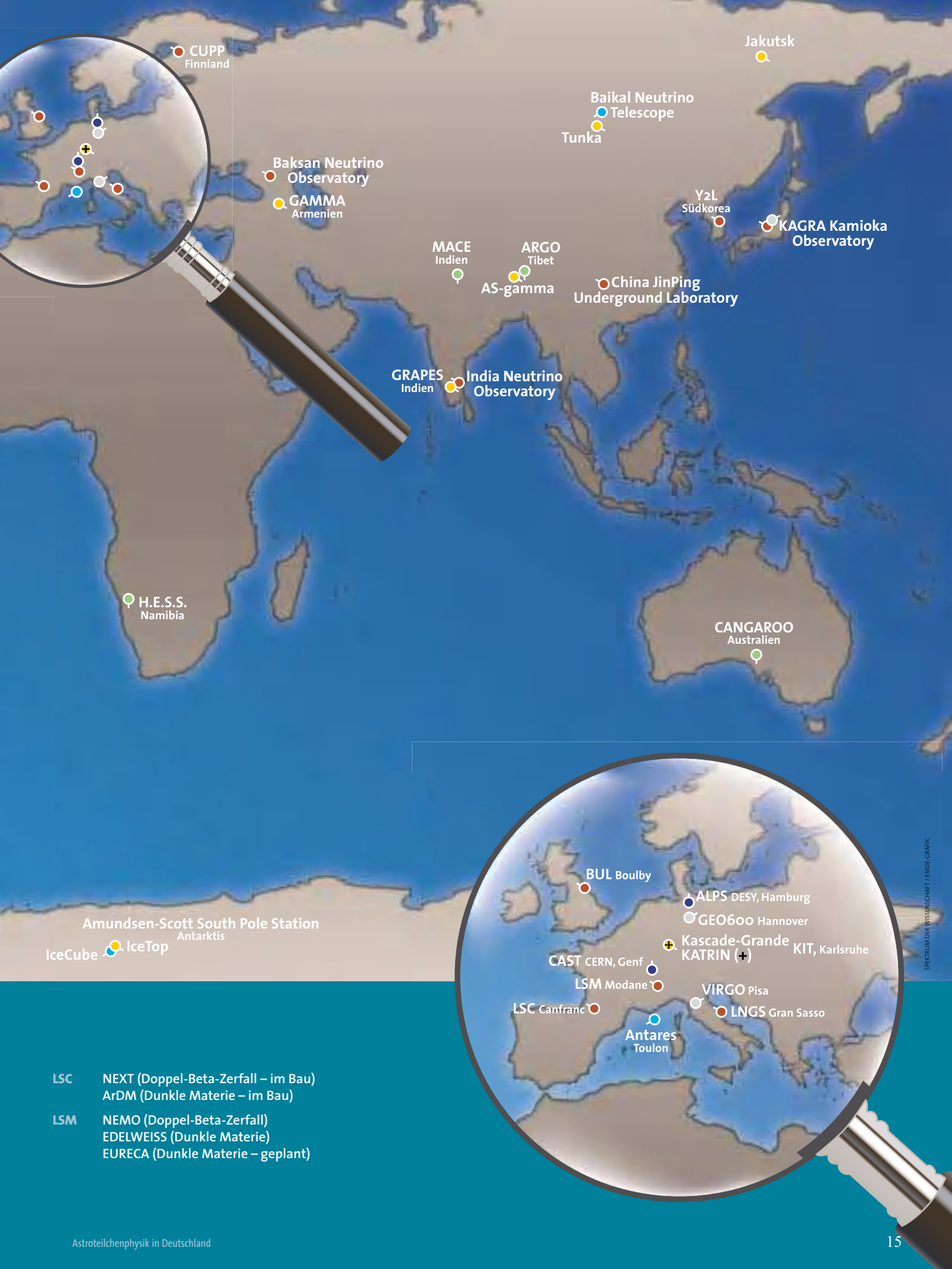
Die wichtigsten Astroteilchen-Experimente in europäischen Untergrundlabors

Baksan
SAGE (Sonnenneutrinos)
BUST (Supernovaneutrinos)

BUL
DRIFT (Dunkle Materie – Entwicklung)
Zeplin (Dunkle Materie)

CUPP
EMMA (kosmische Strahlung)
LAGUNA (p-Zerfall, Neutrino-(Astro)physik – geplant)

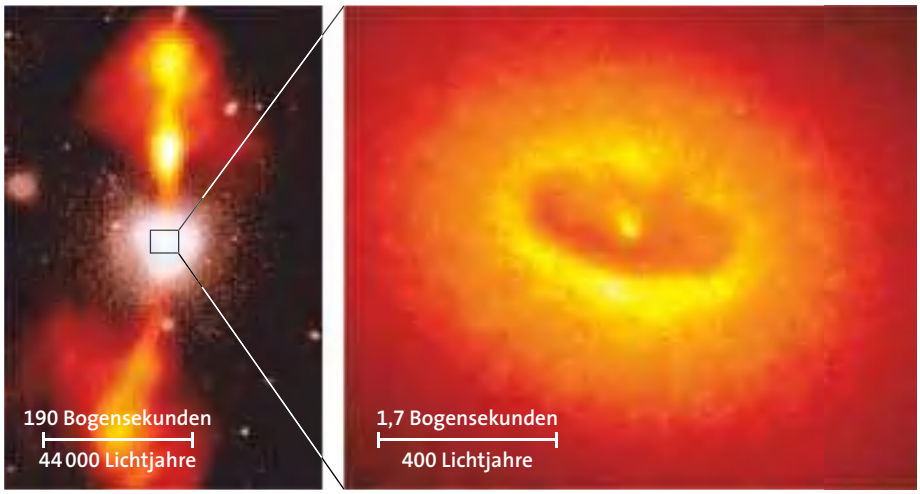
LNGS (Gran Sasso)
COBRA (Doppel-Beta-Zerfall – Prototyp)
CUORE (Doppel-Beta-Zerfall – im Bau)
GERDA (Doppel-Beta-Zerfall)
CRESST (Dunkle Materie)
DAMA/LIBRA (Dunkle Materie)
DarkSide (Dunkle Materie – geplant)
WARP (Dunkle Materie)
XENON100 (Dunkle Materie)
XENON1T (Dunkle Materie – im Bau)
BOREXINO (Sonnenneutrinos)
LVD (Supernova-Neutrinos)



LSC NEXT (Doppel-Beta-Zerfall – im Bau)
ArDM (Dunkle Materie – im Bau)

LSM NEMO (Doppel-Beta-Zerfall)
EDELWEISS (Dunkle Materie)
EURECA (Dunkle Materie – geplant)

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK



LINKS: NRAO / CALTECH; RECHTS: WALTER JAFFE, LEIDEN OBSERV. / HOLLAND FORD, JHU / NASA, STSCI

Quellen kosmischer Strahlen mit Energien von mehr als einer Milliarde Gigaelektronvolt gibt es vermutlich nur außerhalb unserer eigenen Galaxis. Die Bilder zeigen NGC 4261, eine so genannte aktive Galaxie, in deren Kern ein Schwarzes Loch von mehreren Milliarden Sonnenmassen sitzt. Das Schwarze Loch saugt Materie auf Spiralbahnen in sich hinein. Ein Teil der dabei freigesetzten Energie beschleunigt Teilchen – entweder nahe dem Galaxienkern oder entlang der riesigen Materieströme (»Jets«, linkes Bild), die bis zu einer Million Lichtjahre lang werden können.

Das Universum bei extremen Energien

Wenn Sterne explodieren oder Schwarze Löcher Materie verschlingen, schleudern sie energiereiche Teilchen ins All und auch in Richtung Erde. Mit riesigen Detektoren für kosmische Strahlen, Gammastrahlen und Neutrinos kommen ihnen Physiker auf die Spur und entdecken völlig neue kosmische Landschaften.

Vor genau 100 Jahren, im August 1912, stieg der österreichische Physiker Victor Hess mit einem Ballon in eine Höhe von über 5000 Metern auf. Er wollte prüfen, ob die ionisierende Strahlung, die radioaktive Stoffe im Material der Erdkruste aussenden, mit wachsender Entfernung von der Erdoberfläche abnimmt. Doch das Gegenteil war der Fall: Ab 1000 Meter Höhe stieg die Strahlung stetig an. Irgendetwas Ionisierendes, das aus dem Kosmos kam, schien die Erdatmosphäre zu bombardieren!

Als Hess 1936 für seine Entdeckung den Nobelpreis bekam, hatten er und seine Fachkollegen bereits herausgefunden, dass der größte Teil dieser kosmischen Strahlung aus elektrisch geladenen Teilchen besteht: zu 99 Prozent aus Protonen, also den Kernen von Wasserstoffatomen, und Atomkernen schwererer Elemente, zu einem Prozent aus Elektronen. Gut zwei Jahrzehnte später stellte man erstaunt fest, dass einige dieser kosmischen Partikel Schwindel erregende Energien aufweisen. Einige übertreffen die Energie der Teilchen im Superbeschleuniger LHC um das Zehnmillionenfache! Wie schafft die Natur das?

Und nicht genug damit: Die Gesamtenergie der kosmischen Strahlung unserer Milchstraße ist etwa genauso groß wie die Energie, die in galaktischen Magnetfeldern oder in Sternenlicht steckt. Purer Zufall oder eine feine Balance? Wie immer die Antwort lauten mag: Kosmische Strahlen sind offenbar keine Randerscheinung, sondern ein zentrales Phänomen des Kosmos! Ihre Herkunft ist eines der großen Rätsel der Astrophysik.

Teilchen mit extrem hohen Energien können nur bei den gewaltigsten kosmischen Ereignissen entstehen – zum Beispiel

PUBLIC DOMAIN

Ein Aufstieg mit dem Ballon führte Victor Hess (Mitte) 1912 zur Entdeckung der kosmischen Strahlung.

NASA

Das Alpha Magnetic Spectrometer AMS (Pfeil) auf der Internationalen Raumstation dient der Suche nach Antimaterie im Universum. Mit ihm lässt sich das Spektrum niederenergetischer kosmischer Strahlen mit bisher unerreichter Präzision messen.

wenn Gasströme in den Strudel eines massereichen Schwarzen Lochs geraten, sich dabei stark erhitzen und die Energie teilweise in die Beschleunigung von Kernteilchen umgesetzt wird. Die kosmische Strahlung, die auf die Erde trifft, erzählt uns von solchen atemberaubenden Prozessen, verrät uns aber leider nicht, wo sie stattfinden. Elektrisch geladene Teilchen werden nämlich auf ihrer weiten Reise immer wieder durch Magnetfelder abgelenkt. Die Richtung, aus der sie auf die Erde treffen, ist also nicht die Richtung, aus der sie ursprünglich stammen – im Unterschied zu Licht, das uns auf gerader Linie erreicht.

Wo sind die Quellen?

Nur für die Teilchen der allerhöchsten Energien haben die Wissenschaftler eine Chance, die Position der Quellen zumindest grob zu ermitteln, denn ihre Ablenkung ist relativ gering. Leider sind derart energiereiche Teilchen äußerst selten: Auf einen Quadratkilometer der Erdoberfläche trifft nur alle fünf bis zehn Jahre eines dieser superenergetischen Geschosse.

Glücklicherweise dürften die vermuteten Quellen neben den geladenen Partikeln auch neutrale Teilchen oder Strahlung aussenden: Neutrinos und Gammastrahlen. Diese kosmischen Boten breiten sich geradlinig aus, so dass ihre Herkunftsrichtung zurück auf ihre Quellen weist.

Tatsächlich haben die Forscher schon mehr als 150 Quellen am Himmel entdeckt, die extrem harte Gammastrahlen aussenden, mit Energien bis zu einigen hunderttausend Gigaelektronvolt (1 GeV = 1 Milliarde Elektronvolt), dem Zigfachen der LHC-Energie. Falls die Gammastrahlung von denselben Quellen stammt wie die kosmische Teilchenstrahlung, würde sie uns direkt deren Herkunft preisgeben. Doch ist dies tatsächlich der Fall?

Die entscheidenden Hinweise könnten Neutrinos geben. Da sie nur bei Kernreaktionen entstehen, haben sie ihre Reise einst gemeinsam mit einem Atomkern begonnen. Anders gesagt: Jede Quelle hochenergetischer Neutrinos ist immer auch eine Quelle kosmischer Strahlung. Und die Neutrinos verraten uns deren Position, da sie auf ihrem Weg durchs All nicht von Magnetfeldern abgelenkt und – anders als kosmische Strahlen und Gammastrahlen – nicht durch Gaswolken oder sonstige materielle Hindernisse aufgehalten werden. Die Kehrseite der Medaille ist freilich, dass sie viel schwerer nachzuweisen sind.

Um möglichst viel über die kosmischen Quellen herauszufinden, versuchen die Wissenschaftler, alle drei hochenergetischen Strahlungsarten einzufangen: kosmische Strahlung, Gammastrahlen und Neutrinos.

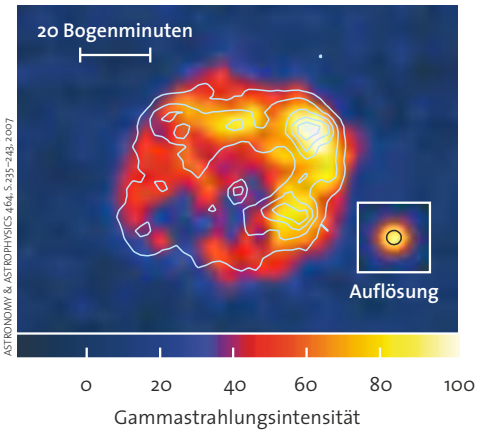
Fahndung im Weltall und auf der Erde

Unter den Teilchen der kosmischen Strahlung, die pro Sekunde auf einen Quadratmeter treffen, ist im Schnitt immerhin eines, dessen Energie 100 GeV oder mehr beträgt. Da reicht schon ein Detektor auf einem Satelliten aus, um genügend davon einzufangen. Das gegenwärtige Topexperiment für GeV-Energien ist das Alpha Magnetic Spectrometer (AMS), das am 16. Mai 2011 mit dem letzten Flug des Spaceshuttles zur Internationalen Raumstation gebracht wurde.

Doch mit zunehmender Energie fällt der Fluss der kosmischen Strahlung steil ab: Nur etwa einmal im Jahr wird ein Quadratmeter von einem Teilchen getroffen, dessen Energie eine Million GeV erreicht! Und rund eine Million Jahre müsste man warten, um mit einem Quadratmeter Detektorfläche ein

Wissenschaftler überprüfen einen der 1660 wassergefüllten Tanks des Pierre-Auger-Observatoriums in der argentinischen Pampa.

ASPERA / AUGER COLLABORATION



AHARONIAN, F.A. ET AL. (HESS COLLABORATION). ASTRONOMY & ASTROPHYSICS 464, S. 235–243, 2007

Der Supernova-Überrest RX J1713.7-3946 im Gammalicht, aufgezeichnet mit Hilfe des H.E.S.S.-Teleskops in Namibia. Die hellen Bereiche hoher Intensität bezeichnen Gebiete, in denen wahrscheinlich kosmische Strahlen auf Materiewolken treffen. Die hellblauen Konturen geben die von einem Satelliten gemessene Intensität im Röntgenlicht an.

Teilchen mit zehn Milliarden GeV zu registrieren.

Die Physiker haben deshalb ein indirektes Verfahren entwickelt: Mit riesigen Anordnungen auf dem Erdboden registrieren sie die Teilchenkaskaden, die entstehen, wenn ein energiereiches Teilchen auf ein Molekül in der Erdatmosphäre prallt. Dabei löst es einen regelrechten Schauer weiterer Teilchen aus, die ihrerseits ebenfalls mit Luftmolekülen in Wechselwirkung treten. Am Ende geht auf einer Fläche mit hunderten Meter Durchmesser eine Vielzahl von Partikeln aus dem »Luftschauer« auf die Erde nieder.

Kosmische Strahlung bis etwa 100 Millionen GeV, die hauptsächlich aus unserer Milchstraße stammen dürfte, wird mit drei Luftschaueranlagen von etwa einem Quadratkilometer Größe untersucht: dem KASCADE-Grande-Experiment in Karlsruhe und, ebenfalls mit deutscher Beteiligung, dem Tunka-Experiment in Sibirien und dem IceTop-Experiment am Südpol. Doch die Größe dieser Anlagen verblasst gegenüber derjenigen des Pierre-Auger-Observatoriums in der argentinischen Pampa, das extragalaktische Quellen entdecken soll. Hier spielt Deutschland zusammen mit den USA eine führende Rolle.

Bei dieser Messanlage (benannt nach dem französischen Physiker Pierre Auger, der in den 1930er Jahren das Phänomen der Luftschauer untersuchte) stehen auf einer Fläche von 3000 Quadratkilometern im Abstand von jeweils 1,5 Kilometern insgesamt 1660 wassergefüllte Tanks. Treten Teilchen aus einem Luftschauer in einen der Tanks ein, so lösen sie darin winzige Lichtsignale aus. Die Tanks werden ergänzt durch zahlreiche Teleskope, die das Fluoreszenzlicht aufzeichnen, das die Teilchenkaskaden in der Atmosphäre erzeugen. Auch die Radiosignale, welche die Luftschauer aussenden, wollen die Forscher demnächst auswerten.

Indem sie all diese Daten kombinieren, gewinnen sie schließlich Aufschluss über Richtung, Energie und bis zu einem gewissen Grad über die Masse des ursprünglichen kosmischen Teilchens. Die pure Größe des Auger-Observatoriums erlaubt es, selbst bei Energien, für die der kosmische Fluss nur etwa ein Teilchen pro Jahr und Quadratkilometer beträgt, eine große Anzahl von Ereignissen zu registrieren.

Das Auger-Observatorium hat bereits viele wertvolle Informationen über das Energiespektrum und die Massenzusammensetzung der extragalaktischen kosmischen Strahlung geliefert. Auch erste Hinweise auf deren kosmische Quellen sind dabei. Um diesen Befund abzusichern, sind jedoch mehr und bessere Daten nötig. Weltweit wird daher überlegt, wie man die energiereichsten Teilchen des Universums mit neuen, noch größeren Detektorfeldern oder vielleicht auch vom Weltraum aus in genügender Anzahl dingfest machen kann.

Der Himmel im Gammalicht

Auch Gammastrahlen hoher Energie lösen in großer Höhe über dem Erdboden Luftschauer aus. Diese Teilchenkaskaden erzeugen einen bläulichen Lichtblitz (Tscherenkowlicht genannt), der von speziellen Teleskopen registriert werden kann. Im Jahr 1989 entdeckte man mit einem solchen Tscherenkow-Teleskop erstmals eine Quelle von Gammastrahlung im Bereich von 1000 GeV – den Krebsnebel, einen leuchtenden Rest eines explodierten Sterns. Seither breitet sich vor den Augen der Physiker allmählich eine Landschaft voller erstaunlicher Phänomene aus. Mehr als 150 Quellen kosmischer Gammastrahlung kennen sie mittlerweile: Supernova-Reste, umeinander kreisende Doppelsterne und aktive Galaxien. Viele Quellen strahlen ruhig vor sich hin, andere leuchten plötzlich einige Tage oder Wochen zehnmal so stark wie sonst – und niemand kann sagen, was dort vor sich geht. Wieder andere Quellen wurden vorher in überhaupt keinem anderen Wellenlängenbereich gesichtet – ein weiteres Rätsel.

Die Durchbrüche der jüngeren Zeit auf diesem Gebiet sind insbesondere zwei Teleskopanlagen zu verdanken. Das nach Victor Hess benannte H.E.S.S.-Teleskop (High Energy Stereoscopic System) in Namibia sammelt das Tscherenkowlicht von Luftschauern in vier Teleskopschüsseln mit je zwölf Meter Durchmesser. Die zwei MAGIC-Teleskope (Major Atmospheric Gamma-ray Ima-

ASPERA / ROBERT WAGNER, MPI FÜR PHYSIK, MÜNCHEN

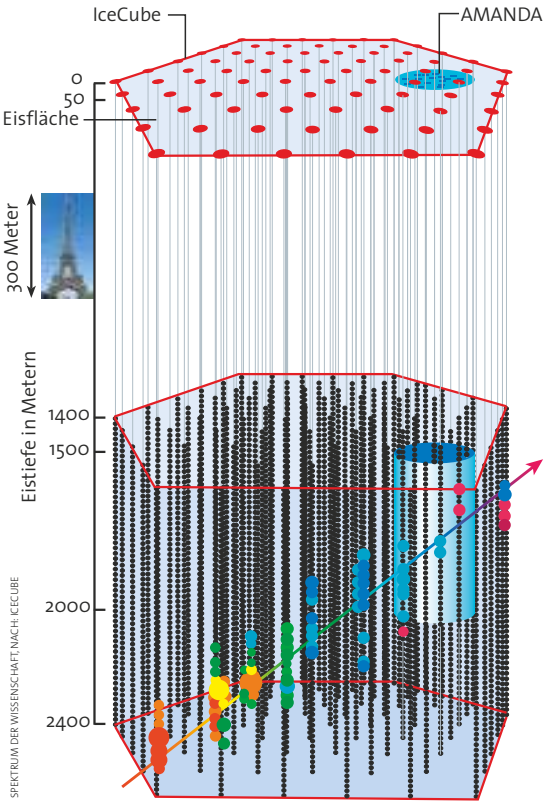
Auch am klaren Nachthimmel über den Kanarischen Inseln fahnden Forscher nach Gammastrahlung aus dem Kosmos. Das Foto zeigt eines der beiden MAGIC-Teleskope auf La Palma, deren Spiegel einen Durchmesser von je 17 Metern aufweisen.

Das zukünftige Cherenkov Telescope Array (CTA) soll aus zahlreichen Einzelteleskopen unterschiedlicher Größe bestehen.

GABRIEL PÉREZ DÍAZ, INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS (SERVICIO MULTIMEDIA)

ging Cherenkov Telescopes) auf den Kanarischen Inseln weisen sogar je 17 Meter Spiegeldurchmesser auf. Auch bei Bau und Betrieb dieser Instrumente nimmt Deutschland eine Führungsrolle ein.

Das große Zukunftsprojekt dieses Gebiets heißt CTA (Cherenkov Telescope Array). Es vereint alle weltweit in dem Feld arbeitenden Experten aus Europa, aus den USA, aus Japan, aus Indien und aus Südamerika. CTA soll aus 50 bis 100 Einzelteleskopen unterschiedlicher Größe bestehen. Seine Empfindlichkeit wird zehnmal besser sein als die von MAGIC und H.E.S.S. Zudem kann es die Richtung der Gammastrahlen und damit ihren kosmischen Ursprung viel genauer bestimmen. Auch den Messbereich wird CTA gewaltig erweitern, zu niedrigen ebenso wie zu hohen Energien hin. Die Forscher erwarten, mit CTA mehr als 1000 neue Quellen zu entdecken. Aus den Feinheiten der gemessenen Spektren werden sie dann auch sicherer als jetzt ablesen können, ob die jeweilige Quelle vorwiegend Protonen oder vorwiegend Elektronen beschleunigt.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: ICECUBE

Ein Myon aus einer Neutrinoreaktion tritt von links unten in IceCube ein und wird von einigen Dutzend Lichtsensoren registriert (farbige Punkte).

Neutrinosuche im antarktischen Eis

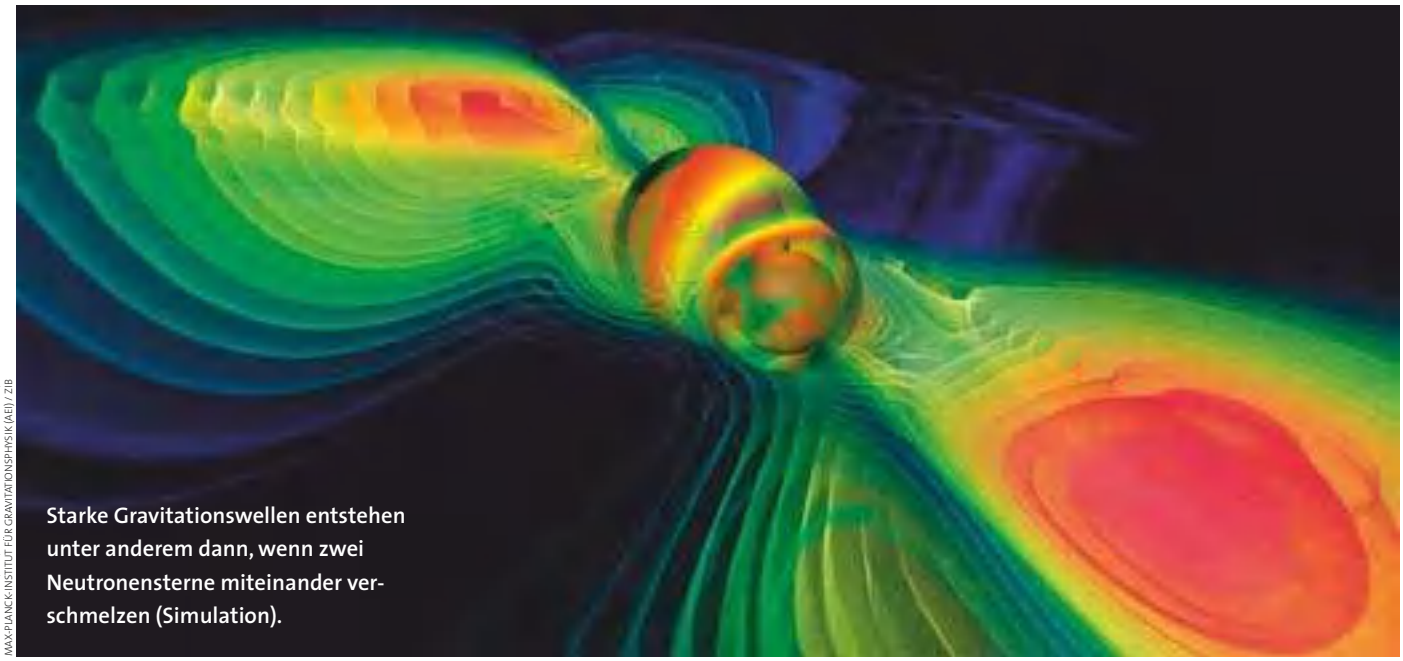
Die Himmelskarte energiereicher Neutrinos ist bis jetzt noch leer, wenn man einmal von denjenigen Neutrinos absieht, die durch Stöße kosmischer Strahlen in der Erdatmosphäre erzeugt wurden (so genannte atmosphärische Neutrinos). Ein unbekannter Kontinent, der die Erkundung regelrecht herausfordert.

Die »Erkundungsinstrumente« werden tief im Wasser von Seen oder Ozeanen oder gar im antarktischen Eis installiert. Verteilt über ein möglichst großes Volumen registrieren sie das Tscherenkowlicht, das bei den seltenen Neutrinoreaktionen durch sekundäre, geladene Teilchen erzeugt wird. Die interessantesten Teilchen kommen dabei – von unten! Was aus dieser Richtung kommt, muss zuvor die Erde und damit tausende Kilometer Gestein durchquert haben. Das aber schaffen nur Neutrinos. Ein von unten kommendes Sekundärteilchen ist daher mit großer Sicherheit durch ein Neutrino ausgelöst worden.

Die Suche nach hochenergetischen kosmischen Neutrinos begann mit einem bescheidenen Detektor im sibirischen Baikalsee. Russische und deutsche Forscher installierten Sensoren in druckfesten Glaskugeln und ließen diese 1000 Meter in den See hinab. 1994 registrierten sie die ersten beiden von unten nach oben laufenden Teilchen. Dabei handelte es sich um atmosphärische Neutrinos, denn der Baikal-Detektor war viel zu klein, um die seltenen Neutrinos kosmischen Ursprungs einzufangen. Längst aber hat er Nachfolger bekommen.

Zunächst sammelte das Neutrinoteleskop AMANDA (Antarctic Muon And Neutrino Detector Array) Daten. Einige hundert Meter vom geografischen Südpol entfernt registrierte es Teilchen, die vom Nordhimmel stammten. Für den AMANDA-Nachfolger IceCube, der direkt unter der US-amerikanischen Amundsen-Scott-Station liegt, wurde sogar ein ganzer Kubikkilometer des antarktischen Eispanzers in 1,5 bis 2,5 Kilometer Tiefe mit Lichtsensoren bestückt. An 86 Kabelsträngen hängen in regelmäßigen Abständen jeweils 60 Detektoren – insgesamt also 5160 Stück. Mit etwa einem Fünftel der beteiligten Wissenschaftler stellt Deutschland nach den USA das stärkste Kontingent bei IceCube. Seit seiner Fertigstellung 2010 hat der Detektor etwa 100 000 meist atmosphärische Neutrinos aufgezeichnet.

Bald soll IceCube weitere Verstärkung bekommen. Schon jetzt sammelt eine Gruppe europäischer Universitäten Erfahrungen mit dem ANTARES-Detektor (Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch project) im Mittelmeer vor Toulon, der ebenso groß ist wie AMANDA (und damit 30-mal kleiner als IceCube). Sein Nachfolger KM3NeT (kurz für: Kubikkilometer-Neutrino-Teleskop) wird dagegen ein Volumen von sechs Kubikkilometern einnehmen und ergänzend zu IceCube jene energiereichen Neutrinos vermessen, die vom Südhimmel her die Erde durchqueren. Auch an ANTARES und KM3NET ist eine deutsche Universität beteiligt.



WERNER BENGER, LSU, CCT UND UNIVERSITÄT INNSBRUCK, INSTITUT FÜR ASTRO- UND TEILCHENPHYSIK / MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR GRAVITATIONSPHYSIK (AEI) / ZIB

Starke Gravitationswellen entstehen unter anderem dann, wenn zwei Neutronensterne miteinander verschmelzen (Simulation).

Einsteins Vermächtnis

Mit kilometerlangen Interferometern wollen Physiker Gravitationswellen nachweisen. Damit werden sie nicht nur ein völlig neues Fenster in den Kosmos öffnen, sondern auch die letzte noch fehlende Bestätigung für Einsteins allgemeine Relativitätstheorie liefern.

Mit der allgemeinen Relativitätstheorie legte Albert Einstein vor knapp 100 Jahren die bisher genaueste Beschreibung der Gravitation, der Schwerkraft, vor. Die meisten der Phänomene, die sich zwangsläufig aus dieser Theorie ergeben, wurden in den vergangenen Jahrzehnten bestätigt. Nur eines hat sich bisher hartnäckig einem direkten Nachweis widersetzt: Gravitationswellen.

Gravitationswellen sind winzige Verformungen der Raumzeit. Immer dann, wenn kompakte Himmelskörper wie Neutronensterne oder Schwarze Löcher miteinander verschmelzen oder Sterne als Supernovae explodieren, sollten sie Einsteins Vorhersage zufolge den Raum erzittern lassen. Die Verwerfungen breiten sich wellenartig mit Lichtgeschwindigkeit im Raum aus und sollten den Abstand zwischen Objekten rhythmisch dehnen und stauchen.

Der zu erwartende Effekt ist freilich winzig: Die Gravitationswellen, die von einer Supernova in einer nahen Galaxie ausgehen, würden den Abstand zwischen Erde und Sonne nur um den Durchmesser eines Wasserstoffatoms verändern, und auch das nur für ein paar Millisekunden! Das wusste bereits Einstein, der sich darum sicher war, dass man Gravitationswellen nie direkt werde nachweisen können.

Indirekt gelang das schon in den 1970ern. Über Jahre hinweg hatten die US-Amerikaner Russell Hulse und Joseph Taylor zwei extrem kompakte Neutronensterne beobach-

Die Gravitationswelleninterferometrie entwickelt sich schnell. Während GEO600 über zwei 600 Meter lange Arme verfügt, besteht das künftige Einstein Telescope E.T. aus drei jeweils zehn Kilometer langen Interferometerarmen (Illustration nicht maßstabsgetreu). Die Arme der geplanten Satellitenmission eLISA/NGO sollen sogar einige Millionen Kilometer lang sein.

GEO600

DEUTSCHE LUFTBILD, HAMBURG / MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR GRAVITATIONSPHYSIK (AEI) / LEIBNIZ UNIVERSITÄT HANNOVER

tet, die einander eng umkreisen. Einsteins Theorie zufolge müssten sie dabei kontinuierlich Energie in Form von Gravitationswellen abgeben. Dadurch müsste sich die Rotationsgeschwindigkeit ändern. Genau das stellten die beiden fest und erhielten dafür 1993 den Nobelpreis für Physik.

Verräterisches Flackern im Interferenzmuster

Bald aber werden Physiker Gravitationswellen mit kilometerlangen Interferometern direkt messen und damit Einsteins Vermächtnis vollständig erfüllen. Im Zentrum eines solchen Interferometers arbeitet ein extrem leistungsstarker Laser. Sein Strahl wird aufgeteilt und dann im Hochvakuum entlang zweier senkrecht zueinander stehender Röhren geschickt. Am Ende dieser »Arme« reflektieren erschütterungsfrei aufgehängte Spiegel die beiden Strahlen zurück zu ihrem Ausgangspunkt. Dort überlagern sie sich und erzeugen ein Interferenzmuster. Eine Gravitationswelle, die über diese Anordnung hinwegläuft, würde den Raum entlang der beiden Arme unterschiedlich stauchen und dadurch zu einem kurzen Flackern im Interferenzmuster führen. Im letzten Jahrzehnt konnten die Forscher die Laserleistung drastisch erhöhen und störendes Rauschen besser aus ihren Daten filtern. Innovationen wie diese stammen vor allem von deutschen Wissenschaftlern.

Gegenwärtig gibt es vier solcher Rieseninterferometer: In Deutschland horcht GEO600 ins All, ein Gravitationswellendetektor bei Hannover mit 600 Meter langen Armen. Ebenfalls auf der Suche nach kosmischen Signalen sind das italienische Observatorium VIRGO mit drei Kilometer Armlänge sowie zwei LIGO-Detektoren in den USA, deren Arme je vier Kilometer lang sind.

Der anfallende Datenwust wird nach periodischen Signalen oder kurzen Ausschlägen durchforstet, die sich in dem Rauschen verbergen könnten – bislang ohne Erfolg. Immerhin sind die Detektoren schon so empfindlich, dass sie das Verschmelzen zweier Schwarzer Löcher im Umkreis von einigen hundert Millionen Lichtjahren hätten entdecken müssen. Allerdings geschieht so etwas nur alle zehn bis hundert Jahre. Man braucht also sehr viel Geduld.

Das soll sich demnächst allerdings ändern. Bis 2015 stehen umfangreiche Verbesserungen an den gegenwärtigen Anlagen an. Japanische Wissenschaftler beginnen zudem mit dem Bau einer Drei-Kilometer-Anlage, dem LCGT. Alle gemeinsam werden dann ein kosmisches Volumen überwachen, das tausendmal so groß ist wie jenes, das die jetzigen Interferometer im Blick haben. Damit dürfen die Forscher in jedem Jahr auf zehn bis hundert Entdeckungen hoffen. Nach einem vier Jahrzehnte langen Marsch beginnt so zaghaft die Gravitationswellenastronomie und öffnet ein neues Fenster ins All.

Mit dem Superprojekt E.T. unter die Erde

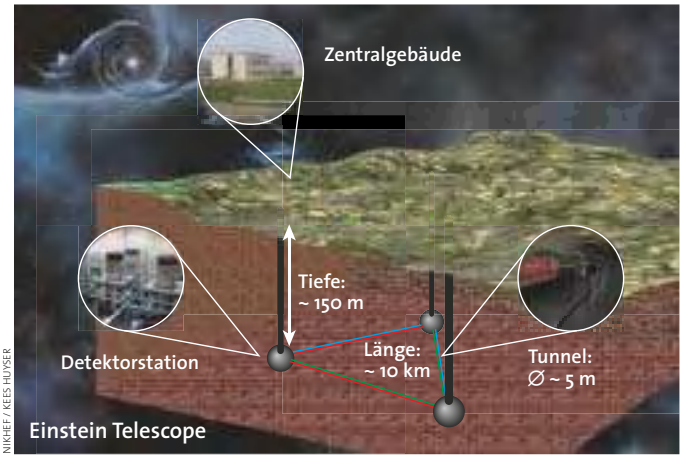
Mit den ersten klaren Signalen von Gravitationswellen in der Tasche, will die weltweite Gemeinde der Gravitationswellenforscher schließlich ein Superprojekt verwirklichen: E.T., das Einstein Gravitational Wave Telescope. Dieses Instrument soll eine Armlänge von zehn Kilometern haben und Gravitationswellen bis hinab in den Frequenzbereich von wenigen Hertz nachweisen. Seine Arme werden unterirdisch verlaufen, damit der Laserstrahl besser von störenden Einflüssen in der Atmosphäre und auf der Erdoberfläche abgeschirmt ist.

E.T. wird viele tausend Ereignisse pro Jahr registrieren – und vielleicht sogar Gravitationswellen aufspüren, die im Verlauf des Urknalls ausgelöst wurden. Diese Wellen schwingen allerdings am stärksten im Bereich von einigen Millihertz. Um so niederfrequente Signale nachzuweisen, braucht man ein Interferometer, dessen Arme Millionen Kilometer lang sind. Und das geht nur im Weltraum.

Detektor-Trio im All mit Rekordarmlänge

Das Weltraumprojekt für Gravitationswellen heißt eLISA/NGO (eLISA steht für European Laser Interferometer Space Antenna, NGO für New Gravitational Observatory). Es soll aus drei Raumsonden bestehen, welche einige Millionen Kilometer voneinander entfernt durch das All fliegen und die Eckpunkte eines riesigen, dreieckigen Interferometers bilden. Wesentliche technische Aspekte von LISA sollen 2014 mit einem Prototyp, dem LISA Pathfinder, getestet werden. Wenn dieses Unternehmen erfolgreich ist, soll eLISA/NGO im Jahr 2022 abheben.

Mit E.T. und LISA wird man den Frequenzbereich von Millihertz bis Kilohertz abdecken. Sechs Größenordnungen! Zum Vergleich: Von Radarwellen über Infrarotlicht, sichtbares Licht und UV-Strahlung bis zu weicher Röntgenstrahlung sind es auch sechs Größenordnungen. Dann werden Gravitationswellen einen ähnlich differenzierten Blick auf die gewaltigsten Ereignisse im Kosmos eröffnen wie elektromagnetische Wellen – eine fantastische Vorstellung!



NIKHEF / KEES HUYSER

EADS / ASTRIUM

Astroteilchenphysik für alle

Die Astroteilchenphysik widmet sich grundlegenden Fragen des Kosmos. Ihre Themen stimulieren die Fantasie einer breiten Öffentlichkeit, und populäre Vorträge der beteiligten Forscher sind inzwischen Publikumsmagneten. Schon Schüler erfahren bei Experimenten zur kosmischen Strahlung ganz praktisch, was Wissenschaft bedeutet. Viele fangen dabei Feuer und überlegen sich, später Natur- oder Ingenieurwissenschaften zu studieren.

Die Astroteilchenphysik ist wie geschaffen dafür, Laien für die Grundlagenforschung zu begeistern. Sie stellt fundamentale Fragen, die nicht von ungefähr häufig als Rätsel bezeichnet werden: Das Rätsel der Dunklen Materie, von der wir immer noch nicht wissen, woraus sie besteht; die ungeklärte Herkunft der energiereichsten Teilchen, die uns aus den Tiefen des Kosmos erreichen; die Botschaft, die uns die geisterhaften Neutrinos aus dem Innern von Sternen überbringen. Und endlich: die Bedeutung von alldem für die Entstehung jener atemberaubenden Welt, die uns die Astronomen mit ihren wunderschönen Bildern zeigen; und damit – wie könnte es anders sein – auch die Rolle für unsere eigene Existenz!

So faszinierend diese Fragen sind, so beeindruckend sind auch die Mittel, mit denen die Wissenschaftler sie beantworten wollen. Die technischen Lösungen bewegen sich am Rande des Machbaren, und die häufig exotischen Standorte der Experimente tragen ein Übriges zur Faszination bei.

Das alles macht die Astroteilchenphysik, ähnlich wie die Astronomie, zu einem Publikumsmagneten. In der Tat herrscht überall dort, wo sich diese junge Wissenschaftsdisziplin präsentiert, überwältigender Andrang. Tage der offenen Tür, Lange Nächte der Wissenschaften, populärwissenschaftliche Vorträge etwa in der Berliner URANIA oder im Deutschen Museum in München und auch Sonntagsvorlesungen an Universitäten sind bestens besucht. Vorträge mit Titeln wie »Neutrinos – Geheimschrift des Kosmos« bringen es auf Zehntausende Abrufe bei YouTube.

DESY

Schüler untersuchen die kosmische Strahlung mit zwei aus Thermoskannen hergestellten Teilchenzählern, die auf Grund ihrer Form und in Anspielung auf den japanischen Neutrinodetektor Kamiokande »Kamiokanne« genannt werden.

Vielerorts kann man auch die praktischen Seiten dieser Wissenschaft kennen lernen und dabei begreifen, wie Grundlagenforschung funktioniert. Bei »Forschungswochen« an mehr als einem Dutzend Universitäten und Forschungszentren können Schüler und ihre Lehrer schon seit Jahren eigene Versuche mit kosmischer Strahlung durchführen. Untersuchungsmaterial liefert der Kosmos frei Haus, und schon mit kleinen Anordnungen, die auf einen Schultisch passen, lassen sich lehrreiche Messungen durchführen: Um welche Teilchensorten handelt es sich? Aus welchen Richtungen stammen die Teilchen? Wie hoch sind ihre Energien? Und ist ihre Zahl tatsächlich vom Wetter abhängig?

Mit einer simplen wassergefüllten Thermoskanne können Schüler sogar nachvollziehen, wie das unterirdische japanische Neutrinoexperiment Super-Kamiokande funktioniert. An der »Kamiokanne« nämlich (siehe Foto links) ist ein Fotoelektronenvervielfacher angebracht. Wenn Teilchen das Wasser durchdringen – unsichtbar und unhörbar –, registriert er das Licht, das sie darin erzeugen.

Andere Teilchenzähler für die Schülerbildung haben ein griffiges Laptopformat. Ebenso wie die Kamiokannen werden sie auf Anfrage an Schulen ausgeliehen. Solche Zähler waren auch bei Schiffsreisen in die

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: DESY; POLARSTERN: AWI; ODEN: PUBLIC DOMAIN

Die Zahl der auf der Erde eintreffenden kosmischen Teilchen hängt vom Breitengrad ab. Am DESY gefertigte Detektoren reisten darum an Bord des schwedischen Eisbrechers »Oden« (rote Route) sowie des deutschen Forschungsschiffs »Polarstern« (blaue Route) in die Antarktis. Die gewonnenen Daten kann bald jeder Interessierte über das Internet abrufen.

Antarktis mit an Bord, zuerst auf dem schwedischen Eisbrecher »Oden« und danach auf dem Forschungsschiff »Polarstern« des Alfred-Wegener-Instituts in Bremerhaven. Auf ihrer Route haben sie aufgezeichnet, wie die Zahl der auf die Erde prasselnden Teilchen von der geografischen Breite abhängt und welche Rolle das Erdmagnetfeld dabei spielt. Die gewonnenen Daten können Schüler nun bald über das Internet auswerten.

Mittlerweile sind all diese Aktivitäten innerhalb des deutschlandweiten Cosmic-Projekts gebündelt und in das »Netzwerk Teilchenwelt« integriert. Zu diesem Netzwerk haben sich 22 deutsche Forschungsinstitute sowie das CERN zusammengeschlossen. Mit dem Cosmic-Projekt erwerben Jugendliche neben Grundlagenwissen zur Teilchen- und Astroteilchenphysik auch Kenntnisse darüber, wie sie eigene Forschungsergebnisse darstellen können. Sie erfahren, wie man wissenschaftliche Daten korrekt auswertet und beurteilt, und sie werden spielerisch an Dinge herangeführt, die uns auch im Alltag begegnen. Wer zum Beispiel die Statistik für die Auswertung von Teilchenreaktionen verstanden hat, tappt nicht mehr so leicht in die Fallen, die uns manche statistische Angabe in Presse und Fernsehen stellt.

Die Öffentlichkeitsarbeit auf dem Gebiet ist auch international vernetzt. Das europäische Netzwerk der Astroteilchenphysik ASPERA (Link siehe Kasten) bietet über seinen monatlich erscheinenden Newsletter aktuelle und allgemeinverständliche Informationen über Neuigkeiten in der Astroteilchenphysik. Und in Deutschland nutzt die Helmholtz-Allianz für Astroteilchenphysik sogar soziale Netzwerke wie Facebook und Twitter, um tagesaktuell auf interessante Neuigkeiten des Gebiets hinzuweisen.

Unterdessen wächst die Anzahl begabter und enthusiastischer Studierender der Astroteilchenphysik stetig. An 26 deutschen Universitäten ist die Disziplin mittlerweile ein eigenständiges Lehrfach. Auch Graduiertenschulen und Sommerschulen widmen sich ihr. Im Jahr 2011 haben fast hundert Studierende den Master oder das Diplom auf diesem Gebiet erworben, und etwa fünfzig wurden sogar über Themen aus der Astroteilchenphysik promoviert. Dabei haben die angehenden Wissenschaftler die Arbeit in internationalen Großprojekten gelernt, haben mit innovativer Technologie gearbeitet und selbst mitgeholfen, die Grenzen des technisch Möglichen zu erweitern. All das macht sie zu begehrten Mitarbeitern für High-Tech-Firmen.

DESY

In einer Funkenkammer befinden sich mehrere unter Hochspannung stehende Platten, umgeben von einem Edelgas. Energiereiche Teilchen aus dem All schlagen Elektronen aus dessen Atomhülle, wodurch das Gas leitet und ein Funke zwischen den Platten überspringt. Eine rötlich leuchtende Ionisationsspur demonstriert so den Weg kosmischer Teilchenstrahlung.

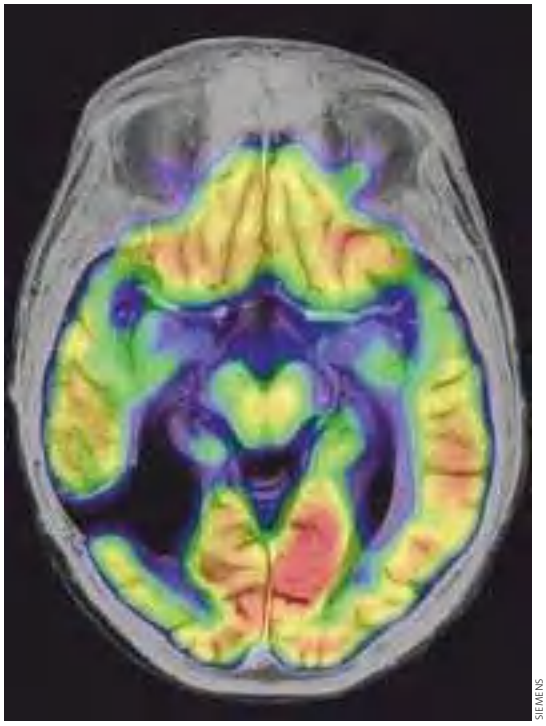
Astroteilchenphysik im Internet

Komitee für Astroteilchenphysik (KAT):
www.kat-astroteilchen.de
Helmholtz-Allianz für Astroteilchenphysik (HAP):
www.hap-astroteilchen.de
Netzwerk Teilchenwelt:
www.teilchenwelt.de
ASPERA, das europäische Netzwerk zur Förderung der Astroteilchenphysik:
www.astroparticle.org

Auf Twitter:
http://twitter.com/teilchenwelt
http://twitter.com/astrohap (HAP)
http://twitter.com/astroparticle (ASPERA)

HAP daily news
http://astrohap.tumblr.com/

SIEMENS



SIEMENS

Technische Innovationen aus der Astroteilchenphysik führen zu unerwarteten Anwendungen. Zum Beispiel lassen sich nun magnetresonanztomografische Aufnahmen (graue Bildbereiche) und positronenemissionstomografische Bilder (farbige Bereiche) kombinieren, etwa um Krebsmetastasen zu lokalisieren (links) oder die verschiedenen Regionen des Gehirns (rechts) zu untersuchen.

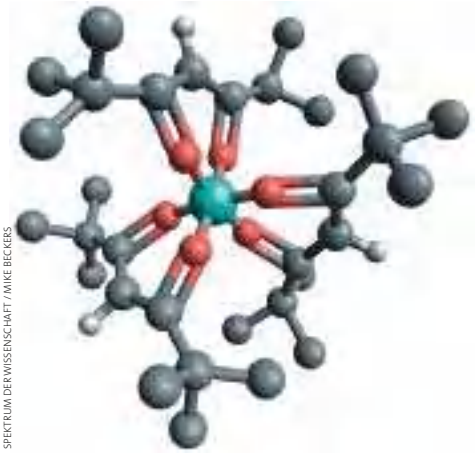
Hightech und Anwendungen

Dass die Teflonpfanne ein Nebenprodukt der Raumfahrt sein soll, ist eine Legende. Andererseits brachte die Raumfahrt eine Fülle von kaum mehr wegzudenkenden Entwicklungen hervor – von der satellitengestützten Wettervorhersage bis zur GPS-Navigation. Auch die Astroteilchenphysik führte schon zu zahlreichen Innovationen, die sich sehen lassen können.

Astroteilchenphysik bewegt sich an den Grenzen des Machbaren. Sie erfordert den Nachweis kleinster Lichtblitze von einigen milliardstel Sekunden Dauer. Experimente zur Suche nach Dunkler Materie oder zum Nachweis von Sonnenneutrinos benötigen Materialien von unvorstellbarer Reinheit. Für das Pierre-Auger-Observatorium musste man ausgeklügelte Kommunikationstechniken entwickeln, um die 1660 Messtanks zeitsynchronisiert betreiben zu können. Einige Anlagen befinden sich in unwirtlichen Umgebungen – tief im Ozean, im antarktischen Eis oder auf hohen Bergen – und stellen in puncto Zuverlässigkeit und Temperaturtoleranz höchste Anforderungen. Viele der dafür notwendigen Entwicklungen haben mittlerweile ihren Weg in die praktische Anwendung gefunden. Einige Beispiele:

■ **Von Neutrinos zur Nahrungsmittelchemie.** Einige Experimente zum Nachweis von Neutrinos nutzen organische Flüssigkeiten, denen das Metall Gadolinium zugesetzt werden muss. Da sich Gadolinium aber in solchen Flüssigkeiten nicht löst, kamen Forscher des Max-Planck-Instituts für Kernphysik in Heidelberg auf die Idee, die Gadoliniumatome in andere Moleküle einzubetten. Diese Trägermoleküle wiederum sind nach außen hin so beschaffen, dass sie sich in der Flüssigkeit lösen. Das Prinzip wurde gemeinsam mit einem Nahrungsmittelhersteller zu voller Produktionsreife entwickelt und wird inzwischen – mit anderen Substanzen – bei der Herstellung von Lebensmitteln eingesetzt.

■ **Von Luftschauern zur Medizintechnik.** Seit Jahrzehnten setzen Physiker Fotoelektronenvervielfacher ein, um schwache Lichtsignale nachzuweisen. Die Technik ist bewährt, stößt aber auch an Grenzen: Die aus einer Elektronenröhre bestehenden Fotoelektronenvervielfacher sind nur schwer zu miniaturisieren, ihre Empfindlichkeit ist nicht besonders hoch, und sie lassen sich nicht in Magnetfeldern betreiben. Vor allem wegen der ersten beiden Punkte haben Astroteilchenphysiker die Entwicklung von



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MIKE BECKERS

Gadoliniumatome (grün) lösen sich in organischen Substanzen nur, wenn man sie in andere Moleküle einbettet. Entwickelt wurde das Verfahren für Neutrinodetektoren, nun wird es auch in der Lebensmittelchemie eingesetzt.

empfindlichen Lichtdetektoren auf Halbleiterbasis (Silizium-Photomultiplier, SiPM) vorangetrieben. SiPMs sind kleiner, zuverlässiger und können – was ihren Anwendungsbereich erheblich erweitert – auch in Magnetfeldern eingesetzt werden. Mit ihnen konnten Ingenieure zwei medizinische Bildgebungsverfahren elegant kombinieren: die Positronenemissionstomografie (PET) und die Magnetresonanztomografie (MRT). Bei der PET wird dem Patienten eine leicht radioaktive Substanz injiziert, deren Zerfall Positronen erzeugt. Diese zerstrahlen mit Elektronen zu Gammaquanten, die den Körper verlassen und in Nachweiskristallen Lichtblitze erzeugen. Solange man für deren Nachweis Fotoelektronenvervielfacher einsetzte, war ein Einbau in ein MRT-Gerät nicht möglich, da dort starke Magnetfelder zum Einsatz kommen. Lichtdetektoren auf Halbleiterbasis schufen Abhilfe: Jetzt können Ärzte MRT und PET gleichzeitig mit einem kompakten Gerät durchführen und auf diese Weise krankes Gewebe sowohl genau lokalisieren als auch klar identifizieren.

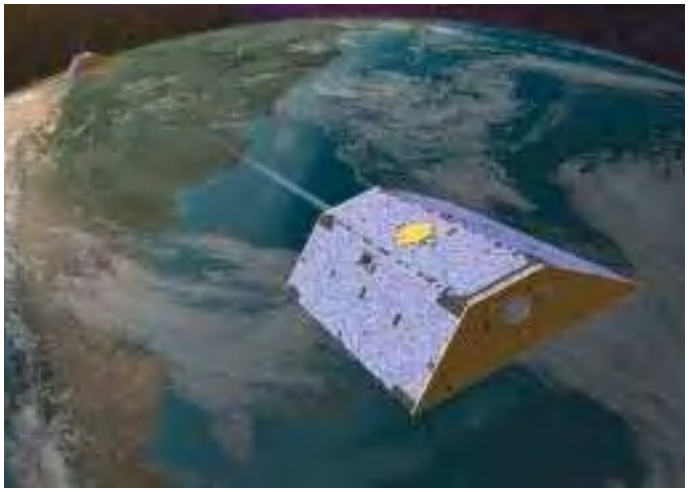
■ **Von Gravitationswellen zur Klimakunde.** Im Rahmen des GRACE-Projekts (Gravity Recovery and Climate Experiment) vermessen zwei deutsch-amerikanische Satelliten seit 2002 das Schwerefeld der Erde. Sie arbeiten hochpräzise: Überfliegt eine der beiden Sonden eine Region mit höherer Schwerkraft als die andere, wird sie etwas beschleunigt, und dadurch entfernen sich die Satelliten ein klein wenig voneinander. Aus dieser Abstandsänderung lässt sich die jeweils herrschende Erdanziehungskraft ermitteln. Mit GRACE messen die Forscher, wie die Masse an der Oberfläche der Erde verteilt ist und wie sich Eisbedeckungen oder Wasserspiegel verändern. Das Folgeprojekt GRACE-FO (GRACE Follow-on) soll noch genauere Daten liefern. Dafür wird 2016 ein Interferometer ins All starten, um mit Laserstrahlen den Abstand zwischen beiden Satelliten noch präziser zu messen – eine Technologie, die ursprünglich für das Gravitationswellenprojekt LISA entwickelt worden war (siehe Beitrag S. 20). Dank ihrer werden die Detektoren für noch kleinere klimatisch bedingte Änderungen des Schwerefelds empfindlich sein.

■ **Von Dunkler Materie zur Halbleiterproduktion.** Viele der Kristalldetektoren, mit denen Astroteilchenphysiker nach der Dunklen Materie suchen (siehe Beitrag auf S. 8), arbeiten bei Temperaturen nahe am absoluten Nullpunkt. Mit solchen extrem gekühlten Kristallen kann man auch die Energie von Röntgenstrahlung messen – zehnmal genauer als mit üblichen Methoden. Das lässt sich nutzen, um Halbleiterchips auf Verunreinigungen durch Fremdatome zu untersuchen. Richtet man nämlich den Strahl eines Elektronenmikroskops auf ein Halbleiterelement, so entsteht an dessen Oberfläche Röntgenstrahlung, die charakteristisch für die jeweilige Atomsorte ist. Mit gekühlten Kristallen kann man die Strahlung extrem genau vermessen und selbst wenige Fremdatome aufspüren.

Hightechentwicklungen, die in die Praxis überführt werden, sind das eine, die Nutzung der Astroteilchenanlagen selbst für die angewandte Forschung das andere. Die Resultate berühren Gebiete wie Atmosphärenphysik und -chemie, Klimatologie, Geologie, Seismologie, Glaziologie, Weltraumwetter, Meeresbiologie und Leben unter extremen Bedingungen. Wieder einige Beispiele:

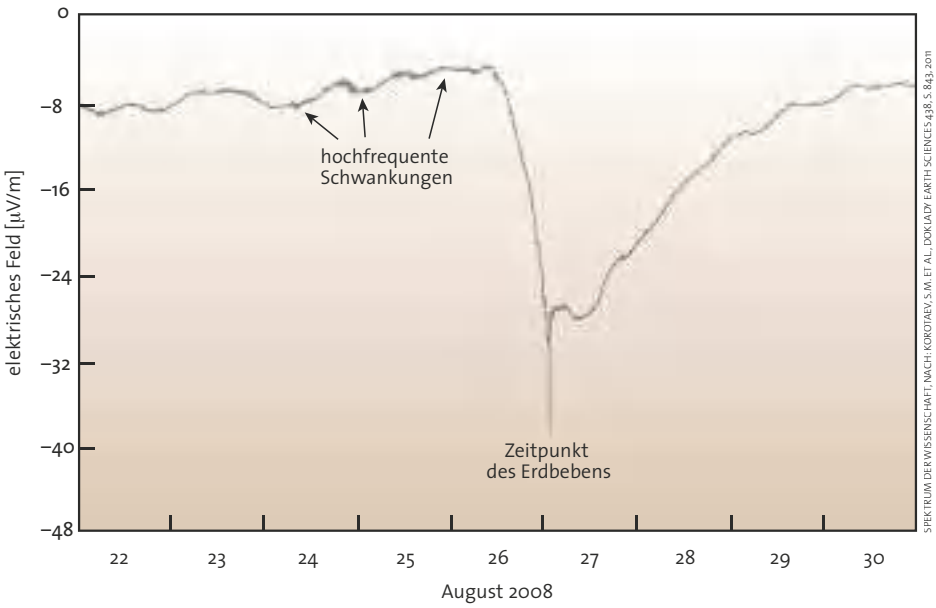
■ **Frühalarm bei magnetischen Sonnenstürmen.** Gelegentlich schleudert die Sonne gewaltige Mengen ionisierter Materie ins All. Ein solcher Materiestrom erreicht uns üblicherweise nach wenigen Tagen. Dann erzeugt er nicht nur farbenprächtige Nord- und Südlichter, sondern verformt auch das irdische Magnetfeld und stört die Satellitenkommunikation und den Flugverkehr. Noch bevor der Sonnensturm die Erde erreicht, verändert er jedoch die Form der Magnetfelder in unserem Sonnensystem. Dies wiederum wirkt sich auf die Wege der schnellen kosmischen Teilchenstrahlung aus. Luftschaueranlagen registrieren deren Ablenkung schon Stunden oder Tage, bevor die Sonnenteilchen eintreffen, und können daher eine Frühwarnung abgeben.

■ **Erdbebenvorhersage.** Könnte man Erdbeben vorhersagen, ließen sich viele Menschenleben retten. Noch ist dies nicht möglich, doch eine Reihe von physikalischen Phänomenen gibt immerhin Hinweise auf bevorstehende Erschütterungen. Dazu zählen Veränderungen der elektrischen Felder in der Erdkruste und der Erdatmosphäre. Sie lassen sich erkennen, indem man in einem wenig leitenden Medium die Spannung



NASA, JPL

Mit dem Satellitenduo GRACE (Fotomontage) vermessen Forscher das Schwerefeld der Erde. Beim Folgeprojekt GRACE-FO kommen laserinterferometrische Methoden zum Einsatz, wie sie für den Nachweis von Gravitationswellen entwickelt wurden.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: KOROTAEV, S. M. ET AL., DOKLADY EARTH SCIENCES 438, S. 843, 2011

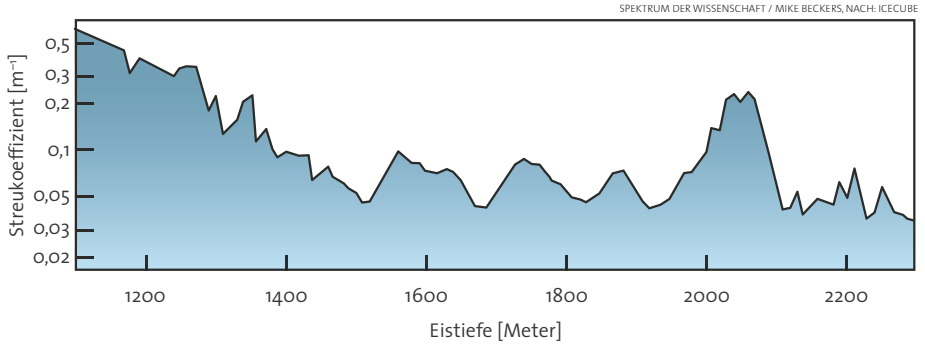
Einem Erdbeben am 27. August 2008 gingen hochfrequente elektrische Schwankungen des Erdfelds voraus, die ein Neutrinodetektor im Baikalsee registrierte. Solche Messungen könnten in Zukunft bei der Erdbebenvorhersage helfen.

über eine große Höhendistanz misst. Der Baikalsee mit mehr als einem Kilometer Tiefe und einer geringen Leitfähigkeit des mineralarmen Wassers bietet für die Aufzeichnung des vertikalen elektrischen Erdfelds beste Voraussetzungen. Gemessen wird über 1250 Meter entlang der Trossen, mit denen der dort installierte Neutrinodetektor verankert ist. Tatsächlich veränderte sich einige Stunden vor einem mittelstarken Erdbeben am 27. August 2008 die Spannung drastisch. Interessanterweise war es schon Tage vorher zu winzigen Schwankungen der Messwerte gekommen. Signale wie diese könnten zu künftigen Frühwarnsystemen für Erdbeben beitragen.

■ **Überwachung der Atmosphärenqualität.** Für Luftschaueranlagen ist die Erdatmosphäre ein Teil des Detektors. Deswegen werden über solchen Anlagen kontinuierlich die Temperatur, die Dichte, der Schwebstoffgehalt und andere Parameter aufgezeichnet. Diese Daten werden auch in meteorologische Netzwerke eingespeist und liefern so Messungen aus Regionen, in denen es keine anderen Wetterstationen gibt.

■ **Bestimmung von Walpopulationen im Mittelmeer.** Extrem energiereiche Neutrinos lösen bei einer Reaktion in Wasser winzige Schallsignale aus. Zu deren Nachweis haben Forscher spezielle »Hydrophone« entwickelt. Mit einer Testanlage im Mittelmeer konnten sie auch die Laute von Walen aufzeichnen und feststellen, dass dort erheblich mehr Pottwale leben als gedacht. Anhand der akustischen Signale ließen sich sogar Walmännchen, Walweibchen und Waljunge unterscheiden.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MIKE BECKERS, NACH: ICECUBE



Das Neutrinoteleskop IceCube dient auch der Klimaforschung. Das Diagramm zeigt den vom Detektor gemessenen Streukoeffizienten des antarktischen Eises als Funktion der Tiefe. Er lässt Rückschlüsse auf Ascheschichten zu, die sich vor Zehntausenden von Jahren infolge von Vulkanausbrüchen ablagerten.

■ **Klimakunde im ewigen Eis.** Schicht für Schicht konserviert der kilometerdicke antarktische Eisschild die Niederschläge, die sich im Lauf von Jahrmillionen auf dem Eis ablagern. Die Schichten enthalten auch kleine Verunreinigungen in Form von Staub oder Asche. Sie liefern einzigartige Datensätze, mit deren Hilfe sich klimatische Veränderungen und Vulkanausbrüche über Hunderttausende von Jahren hinweg untersuchen lassen. Die Ausbreitung von Lichtsignalen im IceCube-Neutrinoteleskop am Südpol wird von diesen Staubschichten beeinflusst. Darum liefert IceCube sozusagen nebenbei Daten zum Staubeintrag mit einer Auflösung von einigen Metern (das entspricht je nach Tiefe einigen hundert bis tausend Jahren). Noch genauere Daten erhält man mit speziellen Sonden, die man in die frisch gebohrten Löcher für die Trossen von IceCube herablässt: einige Millimeter! Mit diesen Sonden ist man auf von Vulkanausbrüchen herrührende dünne Ascheschichten sensitiv. Es zeigte sich, dass Vulkane eine weit größere Rolle als Klimafaktor spielen dürften als bisher angenommen: Ihre Eruptionen traten häufig etwa gleichzeitig mit globalen Klimaänderungen auf.

■ **Entstehung von Blitzen.** Blitzschläge verursachen weltweit jedes Jahr Milliardenschäden und töten hunderte Menschen. Welche Prozesse diese energiereichen atmosphärischen Entladungen auslösen, ist jedoch noch nicht endgültig geklärt. Kosmische Strahlung könnte dabei eine Rolle spielen: Möglicherweise »spurt« sie den Weg durch die Atmosphäre, entlang dessen sich schließlich ein Blitz ausbreitet. Die Korrelation zwischen Teilchenschauern und Blitzen wird unter anderem am Pierre-Auger-Observatorium in Argentinien und mit den Luftschauerdetektoren KASCADE-Grande (Karlsruhe) und Tunka (Sibirien) untersucht.

Forschungsprojekte der Astroteilchenphysik mit deutscher Beteiligung

	Forschungsgegenstand	Standort	deutsche Teilnehmer
IM WELTRAUM			
AMS	Dunkle Materie, Antimaterie		KIT, Universitäten Aachen, Erlangen
Pamela	Dunkle Materie, Antimaterie		Universität Siegen
INTEGRAL	Gammastrahlung, Antimaterie, Nukleosynthese		MPE, MPA, Universitäten Bamberg/Erlangen, Tübingen
Fermi	Gammastrahlung, Dunkle Materie		MPE, MPP, DESY-Z
JEM-EUSO	kosmische Strahlung (geplant)		KIT, Universitäten Erlangen, Tübingen
LISA-Pathfinder	Gravitationswellen (Start 2014)		AEI, MPE
eLISA/NGO	Gravitationswellen (geplant)		AEI, MPE
AUF DER ERDE			
KATRIN	Neutrinomasse	Karlsruhe (im Bau)	KIT, MPIK, Universitäten Bonn, Fulda, Mainz, Münster
TCHIPS	Hidden Photons (Dunkle Materie)	Hamburg	DESY-HH, Universität Hamburg
CAST	Axionen (Dunkle Materie)	Schweiz: Genf	GSI, MPP, MPE, MPS, Universitäten Darmstadt, Freiburg, Frankfurt
KASCADE-Grande	kosmische Strahlen	Karlsruhe	KIT, Universitäten Siegen, Wuppertal, MPIfR
Tunka	kosmische Strahlen	Russland: Tunka-Tal	DESY-Z, KIT, Universität Hamburg
IceTop	kosmische Strahlen	Südpol	DESY-Z, Universitäten Aachen, Berlin (HU), Bochum, Bonn, Dortmund, Mainz, München (TU), Wuppertal
Pierre-Auger-Observatorium	kosmische Strahlen	Argentinien	KIT, Universitäten Aachen, Hamburg, Siegen, Wuppertal
H.E.S.S.	Gammastrahlung	Namibia	MPIK und Sternwarte Heidelberg, DESY-Z, Universitäten Berlin (HU), Bochum, Erlangen, Hamburg, Tübingen
MAGIC	Gammastrahlung	Spanien: Kanarische Inseln	MPP, DESY-Z, Universitäten Dortmund, Würzburg
VERITAS	Gammastrahlung	USA: Arizona	DESY-Z, Universität Potsdam
HiSCORE	Gammastrahlung	Russland: Tunka-Tal (Prototyp-Phase)	DESY-Z, Universität Hamburg
CTA	Gammastrahlung	Festlegung 2012 (Prototyp-Phase)	alle H.E.S.S.-, MAGIC- und VERITAS-Partner
GEO-600	Gravitationswellen	Hannover	AEI, MPE,
LIGO	Gravitationswellen	USA: Washington/Louisiana	Universitäten Berlin (HU), Bremen, Hannover,
E.T.	Gravitationswellen	noch festzulegen (geplant)	Heidelberg, Jena, Tübingen
UNTERTAGE			
BOREXINO	Sonnenneutrinos	Italien: LNGS	MPIK, Universitäten Hamburg, München (TU)
SNO+	Doppel-Beta-Zerfall, Neutrinos	Kanada: Sudbury Lab. (im Bau)	Universität Dresden
LAGUNA	Proton-Zerfall, Neutrinos	Finnland: Pyhäsalmi (geplant)	Universitäten Aachen, Hamburg, München (TU), Tübingen
CRESST	Dunkle Materie	Italien: LNGS	MPP, Universitäten Tübingen, München (TU)
EDELWEISS	Dunkle Materie	Frankreich: LSM	KIT
EURECA	Dunkle Materie	Frankreich: LSM (geplant)	alle CRESST- und EDELWEISS-Partner
XENON	Dunkle Materie	Italien: LNGS	MPIK, Universitäten Mainz, Münster
GERDA	Doppel-Beta-Zerfall	Italien: LNGS	MPIK, Universitäten München (TU), Dresden, Tübingen
COBRA	Doppel-Beta-Zerfall	Italien: LNGS (Prototyp-Phase)	Universitäten Dortmund, Dresden, Erlangen, Hamburg
UNTERWASSER / IM EIS			
NT-200	hochenergetische Neutrinos	Russland: Baikalsee	bis 2008: DESY
IceCube	hochenergetische Neutrinos	Antarktis: Amundsen-Scott-Station	DESY-Z, Universitäten Aachen, Berlin (HU), Bochum, Bonn, Dortmund, Mainz, München (TU), Wuppertal
PINGU	Neutrino-Oszillationen	Antarktis (geplant)	IceCube-Partner und Universität Erlangen
ANTARES	hochenergetische Neutrinos	Mittelmeer vor Toulon	Universität Erlangen
KM3NeT	hochenergetische Neutrinos	Mittelmeer (Prototyp-Phase)	Universitäten Erlangen, Tübingen

Helmholtz-Zentren: KIT (Karlsruher Institut für Technologie), DESY-HH, DESY-Z: Deutsches Elektronensynchrotron, Standorte in Hamburg bzw. Zeuthen, GSI Gesellschaft für Schwerionenforschung Darmstadt.
Max-Planck-Institute: MPIK, MPP, MPE, MPS, MPIfR: Max-Planck-Institute für Kernphysik (Heidelberg), Physik (München), Extraterrestrische Physik (Garching), Sonnensystemforschung (Katlenburg-Lindau) und Radioastronomie (Bonn), AEI: Albert-Einstein-Institute in Hannover und Potsdam.
LNGS: Laboratori Nazionali del Gran Sasso; LSM: Laboratoire Souterrain de Modane

Herausgeber:
KAT
Komitee für Astroteilchenphysik
www.kat-astroteilchen.de

Verantwortlich:
Dr. Christian Spiering
DESY
Platanenallee 6, D-15738 Zeuthen
christian.spiering@desy.de

Mit finanzieller Unterstützung von
DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft
HELMHOLTZ GEMEINSCHAFT
Allianz für Astroteilchenphysik

Eine Publikation von:
Spektrum der Wissenschaft CUSTOM PUBLISHING

Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg,
www.spektrum.de/cp
Leitung: Dr. Joachim Schüring
Redaktionsleiter: Dr. Uwe Reichert
Redaktion: Mike Beckers, Thilo Körkel
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Bärbel Wehner
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle

Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Erscheinungstermin: Spektrum der Wissenschaft 6/2012
Titelmotiv: Spektrum der Wissenschaft / Reinhold Henkel; Krebsnebel: ESO

Standorte der Astroteilchenphysik in Deutschland

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK

Spektrum DER WISSENSCHAFT

HORIZONT-GEOMETRIE
Unendliche Räume endlich machen

JULI 2012

Spektrum DER WISSENSCHAFT 7/12

KERNFUSION
Gefrorene Wasserstoff-kugeln unter Laserbeschuss

KÜNSTLICHES RIECHEN
Sensoren detektieren winzige Gasspuren

HÖHLENBÄREN
Der Untergang der Eiszeitriesen

Länger jung bleiben

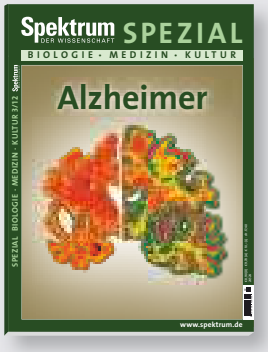
So wollen Forscher das Altern ausbremsen

7,90 € (D/A) · 8,50 € (L) · 14,– sFr.
D6179E

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

www.spektrum.de

Unsere Neuerscheinungen



Spektrum Spezial – Biologie · Medizin · Kultur 3/2012

ALZHEIMER

Unsere Gesellschaft wird immer älter – und damit rücken neben den demografischen Auswirkungen auch häufiger die gesundheitlichen Folgen dieses Prozesses in den Blickpunkt des öffentlichen Interesses. Eine Krankheit, die dabei ganz besonders im Vordergrund steht, ist die Alzheimerdemenz, bei der die Erkrankten einen Großteil ihres Erinnerungsvermögens verlieren. Das **Spektrum-Spezial** »Alzheimer« fasst den momentanen Wissensstand zu dieser heimtückischen Krankheit zusammen und geht der Frage nach, ob und welche Mittel es zur Prophylaxe gibt. Aus dem Inhalt:

> Fortschritte bei der Früherkennung von Alzheimer
> Risikofaktoren der Alzheimerforschung
> Lassen sich verlorene Erinnerungen zurückholen?

Das Spezial Biologie-Medizin-Kultur 3/2012 »Alzheimer« erscheint am 20.07.2012 und kostet € 8,90.
Die Spezial-Reihen können auch unter www.spektrum.de/spezialabo bezogen werden.

SdW-Highlights 2/2012

KOSMISCHE URSPRÜNGE

Innerhalb weniger Generationen gelang es Wissenschaftlern, eine Chronologie des Universums zu skizzieren, die 14 Milliarden Jahre umfasst. Tief reichende Himmelsdurchmusterungen wiederum offenbaren das weitere Schicksal von Sternen und Galaxien. Zu den größten Überraschungen gehört die Entdeckung der Dunklen Energie, die nicht nur die Expansion des Alls beschleunigt, sondern womöglich auf eine neue, bislang unbekannte Physik hindeutet.

Das neue Highlights (unveränderter Nachdruck) kostet € 8,90 zzgl. Versand.
Dieses und weitere Sonderhefte finden Abonnenten von Spektrum der Wissenschaft zum Sonderpreis von € 7,40 (inkl. Inlandsversand) unter www.spektrum.de/aboplus

---

Spektrum Spezial – Physik · Mathematik · Technik 2/2012

MATHEMATHISCHE SPIELE UND STRATEGIEN

Wozu ist Mathematik eigentlich nütze? Auf diese beliebte Frage gibt das vorliegende Heft einige sehr konkrete Antworten. Die Zukunft hält häufig viele Ereignisse für einen bereit, über die man nur sehr magere Kenntnisse hat. Den todsicheren Tipp kann uns die Mathematik zwar nicht liefern, aber sie kann unsere Chancen optimieren, am Ende mit dem bestmöglichen Ergebnis dazustehen. Die hier versammelten Beiträge sind ursprünglich in der Rubrik »Mathematische Unterhaltungen« im Monatsheft von **Spektrum der Wissenschaft** erschienen.

Das Spezial »Mathematische Spiele und Strategien« kostet € 8,90 zzgl. Versand.
Die Spezial-Reihen können auch unter www.spektrum.de/spezialabo bezogen werden.

GEHIRN&GEIST 7-8/2012

Zehnmal pro Jahr erwarten Sie in **G&G** spannende Berichte aus folgenden Themengebieten: Psychologie, Hirnforschung, Medizin, Psychiatrie, Psychotherapie, Philosophie, Pädagogik, Religion, Neurotheorie und künstliche Intelligenz. Themen der aktuellen Ausgabe sind:

>> Werkzeuggebrauch: Wie das Gehirn den Hammer schwingt
>> Literatur: Was Märchen so reizvoll macht
>> Psychotherapie: Seelische Leiden von Migranten
>> Geist und Gene: Welche Rolle spielt unser Erbgut?

Gehirn&Geist kostet € 7,90 als Einzelheft und ist auch im Abonnement (10 Ausgaben pro Jahr) für € 68,– inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 55,–) zu beziehen.

Alle Hefte sind im Handel erhältlich oder unter:

Spektrum DER WISSENSCHAFT
WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

online: spektrum.de/lesershop
E-Mail: service@spektrum.com
Tel.: +49 6221 9126-743

Fax: +49 6221 9126-751
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg

Carsten Könneker
Chefredakteur
koenneker@spektrum.com

Das TOR zu längerem Leben

Kein Wesen kann zu Nichts zerfallen!
Das Ew'ge regt sich fort in allen,
Am Sein erhalte dich beglückt!
Das Sein ist ewig; denn Gesetze
Bewahren die lebend'gen Schätze,
Aus welchen sich das All geschmückt.

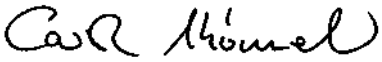
Als Goethe im Februar 1829 diese ersten Zeilen seines Gedichts »Vermächtnis« schrieb, war er 79 Jahre alt. In den weiteren Strophen entwickelte er sein Kredo, das Erkennen der zeitlosen Gesetze von Natur und Moral stelle die zentrale Aufgabe des Menschen dar. Anteil am Ewigen zu suchen, so kann man Goethes lyrisches Testament vielleicht am treffendsten umschreiben, sei die beste Antwort des Menschen auf die Frage der eigenen Endlichkeit.

In der abschließenden siebten Strophe wies Goethe die Auseinandersetzung mit den ersten und letzten Dingen den Philosophen und Dichtern zu. Heute versuchen Gerontologen, die Grenze des Lebens ganz pragmatisch nach hinten zu verschieben. Und hier bahnt sich Erstaunliches an. Womöglich können Mediziner in absehbarer Zeit den Menschheitstraum von der Verlängerung gesunden Lebens dem Reich der Fiktion entreißen. In den letzten Jahren stießen sie auf ein fein austariertes Zusammenspiel von Genen und Proteinen bei kalorienreduzierter Diät, welches möglicherweise den Schlüssel für das Geheimnis darstellt, altersbedingte Erkrankungen wie Morbus Alzheimer, Krebs oder Herz-Kreislauf-Insuffizienz deutlich hinauszuzögern oder gar abzuwenden. Im Zentrum des weltweiten Interesses steht ein Eiweiß namens TOR. Was die Bezeichnung bedeutet und was sie mit einer historischen Expedition zu der berühmten Osterinsel zu tun hat, erklärt David Stipp in seinem Übersichtsartikel ab S. 22. Ich bin sicher, diese Geschichte hätte Goethe elektrisiert!

W I S wissenschaft in die schulen!

Spektrum geht neue Wege. Ab diesem Heft finden Sie in ausgewählten Artikeln Hinweiskästen zu der Initiative »Wissenschaft in die Schulen!«. Dort weisen wir Lehrerinnen und Lehrer auf Unterrichtsmaterial zur Vertiefung eines Themas hin. Die von Redakteuren und Fachdidaktikern erstellten Dokumente sind auf dem vom Verlag Spektrum der Wissenschaft betriebenen Portal www.wissenschaft-schulen.de kostenfrei herunterzuladen. Im vorliegenden Heft finden Sie Übungsunterlagen für die Fächer Biologie und Mathematik (siehe die Hinweise auf S. 32 beziehungsweise S. 66).

Eine anregende Lektüre wünscht
Ihr

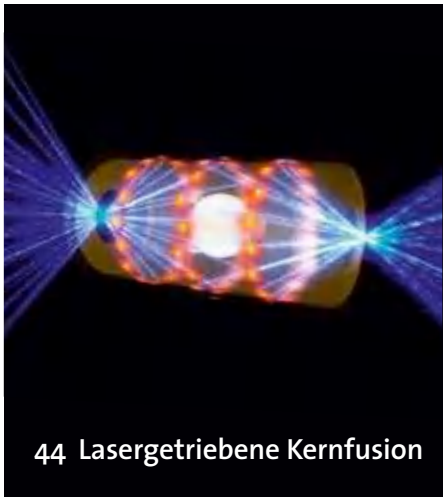


AUTOREN IN DIESEM HEFT

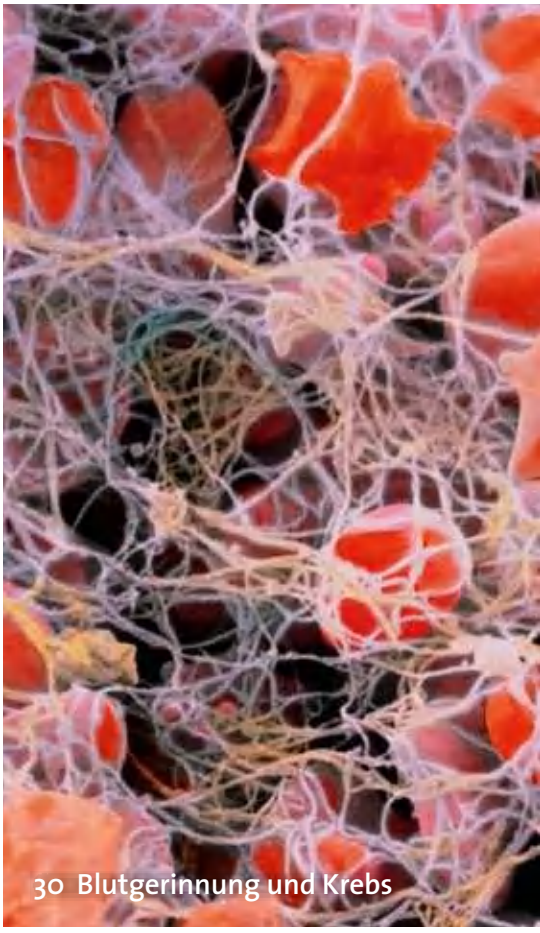
Matthias W. Hentze vom EMBL Heidelberg und **Andreas E. Kulozik** von der Universitätsklinik Heidelberg entdeckten einen komplizierten molekularen Mechanismus in Zellen, der reguliert, wie viel von einem bestimmten Protein entsteht – und brachten an den Tag, auf welche Weise Blutgerinnungsstörungen und Krebs miteinander zusammenhängen (S. 30).

Der junge deutsche Physiker **Andreas J. Kemp** arbeitet in Kalifornien, am größten Laser der Welt. Ziel des Großexperiments: Energieerzeugung durch Trägheitsfusion (S. 44).

Françoise Dal'Bo-Milonet ist Professorin für Mathematik an der Université Rennes 1. Ab S. 60 erklärt sie uns, wie man durch einen »künstlichen Horizont« das Unendliche eines Raums einfängt und der Analyse zugänglich macht.


44 Lasergetriebene Kernfusion

78 Bedrohte Kakaopflanze


30 Blutgerinnung und Krebs

72 Interkontinentale Staubdrift

BIOLOGIE & MEDIZIN

TITELTHEMA

▸ 22 **Ein neuer Weg zu längerem Leben**
David Stipp
Forscher haben einen biochemischen Mechanismus entdeckt, der das Altern hinauszögert und zugleich altersbedingte Krankheiten in Schach hält.

30 **Krebs, Blutgerinnung und Stress – eine Ménage-à-trois**
Matthias Hentze, Andreas Kulozik
Ein Blutgerinnungsfaktor verquickt Belastung, Thromboseneigung und manche Tumorarten.

▸ 36 **Untergang der Höhlenbären**
J.-M. Elalouf, V. Féruglio
Höhlenbilder sowie Knochen, Aufenthaltsspuren und DNA beleuchten die Geschichte dieser Riesen.

PHYSIK & ASTRONOMIE

▸ 44 **Schnelle Zündung für die Trägheitsfusion**
Andreas J. Kemp
Physiker entwickeln immer stärkere Laser, mit denen sie winzige Wasserstoffkügelchen zur Implosion bringen. Das Ziel: mittels Kernfusion Energie zu gewinnen.

SCHLICHTING!

54 **Von wegen 3-D!**
H. Joachim Schlichting
Ein verdunkeltes Auge genügt, damit unser Sehsystem 2-D-Bilder räumlich wahrnimmt.

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

56 **Spiele mit Dimensionen**
Norbert Treitz
Hätten Sie gedacht, dass die gesamte Erdbevölkerung zugleich im Victoriasee planschen könnte?

MENSCH & KULTUR

▸ 60 **Die Geometrie der Horizonte**
Françoise Dal'Bo-Milonet
Mathematiker versehen abstrakte geometrische Räume mit einem Rand, der wie die Fluchtpunkte in der perspektivischen Malerei das Unendliche einfängt. Dieses neue theoretische Werkzeug findet Anwendungen weit über die Geometrie dieser Räume hinaus.

Titelmotiv: Ag. Focus / SPL / Coneyl Jay; Bearbeitung: Spektrum der Wissenschaft

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▸ gekennzeichnet.

22
TITELTHEMA

Länger jung bleiben

So wollen Forscher das Altern ausbremsen

ERDE & UMWELT

72 Von Afrika zum Amazonas
Jeffrey Bartholet
Jedes Jahr werden etwa zwei Milliarden Tonnen Staub aufgewirbelt. Er weht von Kontinent zu Kontinent, düngt Ozeane und hält gewaltige Ökosysteme am Leben. Überdies beeinflusst er das Klima.

78 Die Zukunft der Schokolade
Harold Schmitz und Howard-Yana Shapiro
Den Maya galten Kakaobohnen als Geschenk der Götter, heute begründen sie ein Milliardengeschäft. Doch dessen Zukunft ist ungewiss, denn Klimawandel, Krankheiten und andere Widrigkeiten setzen dem empfindlichen Kakaobaum zu.

TECHNIK & COMPUTER

▸ **84 Schnüffelnde Transistoren**
David R. Walt, Shannon E. Stitzel und Matthew J. Aernecke
Bei der Entwicklung eines verlässlichen elektronischen Geruchssinns sind Forscher ein gutes Stück vorangekommen. Aber noch bleibt manches Problem zu lösen.

Nach S. 92 folgt eine 36-seitige Sonderpublikation des Schweizerischen Nationalfonds

SPEKTROGRAMM

8 Kambrische Explosion • Kleinwuchs der Pygmäen • Riesensee auf Titan • Netzhautimplantat für Blinde • Parasiten leben von Parasiten u. a.

BILD DES MONATS

11 Modernes Goldwaschen

FORSCHUNG AKTUELL

12 Dreiatomiger Wasserstoff
Das Molekül – im Weltall häufig, im Labor nur schwer zu erzeugen – gibt nun seine Geheimnisse preis.

15 Die Geburt der Paarbeziehung
Die Evolution verlief umgekehrt als bisher angenommen.

18 Ein Versteck im Fluss der Zeit
Forscher tarnten ein Ereignis so, als hätte es nie stattgefunden.

SPRINGERS EINWÜRFE

20 Was Drohnen anrichten
Unklare Folgen des Roboterkriegs.

WEITERE RUBRIKEN

3 Editorial

6 Leserbriefe/Impressum

93 Rezensionen
Lisa Randall:
Die Vermessung des Universums
Werner Bartens: Glücksmedizin
Matthias Bloechle:
Vom Recht auf ein gesundes Kind
Dirk Eidemüller:
Das nukleare Zeitalter
u. a.

100 Wissenschaft im Rückblick
Vom Vogelgesang zu Wackelsteinen

101 Exponat des Monats
Die Ozonsonde OSE

102 Vorschau

GEHIRN: ADAM VOORHES PHOTOGRAPHY; HINTERGRUND: ISTOCKPHOTO / ANDREW OSTROVSKY (M); BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Die menschliche Intelligenz scheint gemäß Forschungsergebnissen der letzten Jahre bereits am evolutionär möglichen Maximum angelangt zu sein.

Intelligenz und Hirngröße

Laut Douglas Fox können wir Menschen wegen physikalischer Gesetzmäßigkeiten nicht mehr viel intelligenter werden. (»Die Grenzen des Gehirns«, Mai 2012, S. 26)

Hayo Siemsen, Wadgassen: Intelligenz, insbesondere wie sie in Intelligenztests abgefragt wird, ist teleologisch definiert. Der Begründer der Intelligenztests, Alfred Binet, hat sich dafür einen idealen Logiker vorgestellt. Tatsächlich sind auch die Entwickler von Intelligenztests momentan auf der Suche, wie man Phänomene, welche unter das Thema Intelligenz fallen, beispielsweise emotionale Intelligenz oder intuitive Denkweisen, theoretisch und praktisch erfassen kann. Der Intelligenzbegriff so wie auch der damit zusammenhängende Logikbegriff sind aus unserer westlichen Kultur heraus definiert; in anderen Kulturen weicht er davon zum Teil deutlich ab. Diese Definition wird sich vermutlich in Zukunft stark verändern.

Betrachtet man langfristige biologische Prozesse von einer unsicheren Basis aus, ist das Resultat ziemlich ungewiss. Zudem ist, wie Fox selbst feststellt, die Korrelation zwischen Neuronenzahl und Intelligenz eher gering. Einsteins Gehirn war beispielsweise recht klein. In unserer Kindheit gibt es Phasen, in denen massiv Neurone abgebaut werden. Man braucht sie offenbar nicht. Wie die Neurone vernetzt sind, also welche Ideen man produziert, scheint im Beispiel Einstein viel entscheidender zu sein.

Roland Maier, Riemerling: Die Gehirnvolumina der europäischen Frauen/Männer sanken von 1502/1593 Millilitern in der Mittelsteinzeit auf 1241/1436 Milliliter am Ende des 20. Jahrhunderts. Man müsste die verbreitete Denkweise hinterfragen, nach der eine Vergrößerung des menschlichen Gehirns immer mit einer Zunahme der Intelligenz zu verbinden ist, wogegen aber eine Abnahme dieser grauen Substanz alles bedeuten kann, nur keine Abnahme der Intelligenz. Die zentrale Aussage des Artikels von Douglas Fox, dass unser Denkorgan an einer maximalen Größe angekommen sei, kann auf keinen Fall stimmen. Es wird Zeit, dass unsere Vorstellungen von dem Organ, auf das wir so stolz sind, realistischer werden.

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.)
Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser (Monatshefte), Dr. Gerhard Trageser (Sonderhefte)
Redaktion: Thilo Körkel (Online-Koordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke, Antje Findeklee (Bild des Monats); E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Editor-at-Large: Dr. Reinhard Breuer
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Redaktionsassistenz: Anja Albat-Nollau
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114
Verlagsleiter: Richard Zinken
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Gerald Bosch, Dr. Werner Gans, Christine Kemmet, Dr. Susanne Lipps-Breda, Dr. Ursula Loos, Dierk Schleicher.

Leser- und Bestellservice:
Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung:
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 7,90 (D/A) / € 8,50 (L) /sFr. 14,–; im Abonnement € 84,– für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Die Preise beinhalten € 8,40 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 8,40 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e.V. erhalten SdW zum Vorzugspreis.
Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Bereichsleitung Anzeigen: Marianne Dölz; Anzeigenleitung: Patrick Priesmann, Tel. 0211 887-2315, Fax 0211 887 97-2315; verantwortlich für Anzeigen: Christian Herp, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887 2481, Fax 0211 887-2686
Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 33 vom 01.01. 2012.
Gesamtherstellung: L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2012 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
75 Varick Street, New York, NY 10013-1917
Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven Inchcoombe, Vice President, Operations and Administration: Frances Newburg, Vice President, Finance, and Business Development: Michael Florek, Managing Director, Consumer Marketing: Christian Dorbandt, Vice President and Publisher: Bruce Brandfon

Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

Tollwut statt Porphyrie

Der Botaniker Frank E. Dayan und seine Tochter Emilie beschrieben die vielfältigen Funktionen der Porphyrine in verschiedenen Organismen. (»Ein Ring für die Farben des Lebens«, Juni 2012, S. 30)

Dieter Böning, Berlin: Die Autoren vermuten, dass sich hinter den Symptomen des Vampirismus, die etwa Bram Stoker in seinem Roman »Dracula« beschreibt, die Stoffwechselkrankheit Porphyrie verbirgt. Viel naheliegender ist jedoch, dass die Infektionskrankheit Tollwut das Vorbild für die Vampirsagen liefert. Das Tollwutvirus befällt unter anderem das Gehirn und wird im Speichel ausgeschieden. Tollwütige Tiere und Menschen sind aggressiv und beißen, wobei sie die fast immer tödliche Krankheit weitergeben.

Als Überträger werden in Lehrbüchern der Inneren Medizin neben Fleisch fressenden Säugetieren auch »Blut saugende Fledermäuse« (Vampire!) genannt, die nachts mit ihren scharfen Zähnen die Haut ihrer Opfer ritzen und das Blut als Nahrung lecken. Offensichtlich sind alle diese Beobachtungen in die Vampirsage eingeflossen. Auch das Bespritzen mit Weihwasser als Abwehrmittel gegen Vampire lässt sich sehr einfach deuten: Tollwutkranke sind extrem wasserscheu.

Platon und die Elemente

Der Physiker Claus Kiefer stellte Ansätze vor, wie Quantenphysik und allgemeine Relativitätstheorie vereint werden können. (»Auf dem Weg zur Quantengravitation«, April 2012, S. 34)

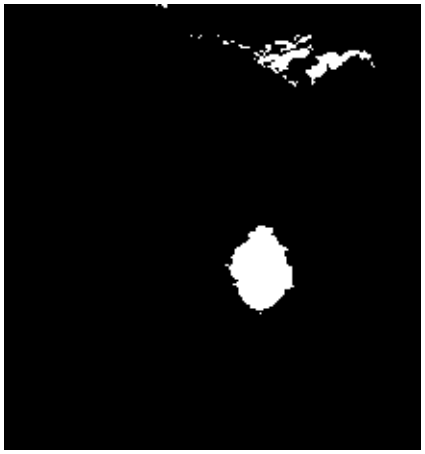
Peter Schmitz, Soest: Interessant an dem Artikel von Claus Kiefer fand ich, dass einige der neuesten Theorien vom Aufbau des Universums immer mehr Ähnlichkeiten zur eigentlich überholten altgriechisch-platonischen Anschauung der materiellen Struktur der Elemente zeigen. So ähnelt etwa das Modell der »dynamischen Triangulation« von Ambjorn, Jurkiewicz und Loll letztlich sehr der Idee von der geometrischen Struktur der Materie, wie sie bereits Platon (428–348 v. Chr.) und Aristoteles (384–322 v. Chr.) im antiken Griechenland als Gegenentwurf zum Atomismusmodell von Demokrit beschrieben. Für Platon war die Welt noch aus den vier Grundelementen Erde, Luft, Feuer und Wasser aufgebaut. Er verglich die kleinsten Teile der Elemente mit geometrischen Grundformen: Erde = Kubus, Luft = Oktaeder, Feuer = Tetraeder und Wasser = Ikosaeder.

Platons reguläre mathematische Körper, die seine vier Elemente darstellen, unterscheiden sich von den Atomen, die Demokrit beschrieb, übrigens darin, dass sie nicht unteilbar sind. Immerhin hat Platon es in seinem Modell als Erster versucht, den Aufbau der (damals bekannten) Materie rein mathematisch darzustellen. Auch die (heute so bezeichnete) Energie, bei ihm als das Element Feuer dargestellt, passte er in dieses Denkmodell ein – ein schon recht weit gedachter Denkschritt für heutige physikalische Versuche einer einheitlichen »Weltformel«.

Ähnlicher Lichteffekt

Glorien liegt der optische Tunneleffekt zu Grunde – so die Erklärung des Physikers H. Moysés Nussenzveig für das Phänomen. (»Das Leuchten des Heiligenscheins«, Mai 2012, S. 52)

Klaus Hagemeyer, Leverkusen: Wir hatten bei unserem letzten Skiurlaub in den Alpen einen optisch ähnlichen, aber sicher ganz anders zu erklärenden Effekt beobachtet, der eher einem Ufo als einem Heiligenschein gleicht (siehe Bild). Die Sonne befand sich nicht hinter dem Beobachter, sondern in gleicher Richtung wie das »Ufo«, nur um einiges höher. Die Lufttemperatur war zirka –25° C und die Luft voller winziger Eisnadeln, die sich zeitweise als blitzende Punkte bemerkbar machten.



Vom Leser beobachtete »Untersonne«

Antwort der Redaktion: Wahrscheinlich handelt es sich bei dem hier beobachteten Effekt um eine so genannte Untersonne, eine Spiegelung der Sonnenstrahlen an den von Ihnen erwähnten Eisnadeln in der Luft (Eisnebel). Der Effekt ist vergleichbar mit der Spiegelung der Sonne an einer glatten Wasserfläche.

FOLGEN SIE UNS IM INTERNET

facebook
www.spektrum.de/facebook

YouTube
www.spektrum.de/youtube

studiVZ
www.spektrum.de/studivz

twitter
www.spektrum.de/twitter

BRIEFE AN DIE REDAKTION

... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf www.spektrum.de/leserbriefe oder schreiben Sie mit Ihrer kompletten Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Leserbriefe
Sigrid Spies
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

Die vollständigen Leserbriefe und Antworten der Autoren finden Sie ebenfalls unter: www.spektrum.de/leserbriefe

GEOLOGIE

Verwitterung an Land ließ Skelette entstehen

Während des Kambriums, dem Zeitraum vor etwa 542 bis 488 Millionen Jahren, entstanden in den Meeren binnen weniger Jahrmillionen fast alle heutigen Tierstämme – und zum ersten Mal auch solche mit mineralisierten Skeletten. Was Paläontologen als »kambrische Explosion« bezeichnen, könnte von einer starken Erosion der Kontinente ausgelöst worden sein.

Forscher um Shanan Peters von der University of Wisconsin (USA) haben den Schichtensprung der »Great Unconformity« untersucht. Hier lagern kambrische Sedimente direkt auf Milliarden Jahre alten Gesteinen des Präkambriums; ursprünglich dazwischen abgelagerte Schichten fehlen. Diese geologische Lücke findet sich in vielen Regionen der Erde und zeugt davon, dass die Meere jener Zeit mehrfach große Teile des Festlands bedeckten und dabei Material abtrugen.

Anhand chemischer Analysen tausender Gesteinsproben aus ganz Nordamerika wiesen die Forscher nach, dass die kambrischen Sedimente oberhalb der Schichtlücke besonders viel Kalzium enthalten. Dieses stammte aus der Verwitterung kontinentaler Gesteine und gelangte bei steigendem Meeresspiegel in die Ozeane. Die daraufhin steigenden Kalziumkonzentrationen im Meerwasser dürften nach Ansicht der Forscher die evolutionäre Entwicklung von Kalkschalen angestoßen haben. Wie Fossilien belegen, kamen damals Kalziumkarbonate und andere wichtige Biominerale wie Hydroxylapatit fast gleichzeitig in verschiedenen Organismengruppen auf. Demnach entstanden die ersten Skelette wohl im Zuge der Anpassung an chemische Veränderungen im Wasser.

Nature 484, S. 363–366, 2012

SHANANE PETERS, UNIVERSITY OF WISCONSIN UND ROBERT R. GAINES, POMONA COLLEGE

Beispiel für die »Great Unconformity«: Im Wind River Canyon, USA, liegt 510 Millionen Jahre altes Gestein (obere Bildhälfte) auf 2900 Millionen Jahre altem (unten). Die Zehn-Cent-Münze rechts im Bild dient zum Größenvergleich.

GENETIK

Starkes Immunsystem führt zu Kleinwuchs der Pygmäen

Die afrikanischen Pygmäen fallen durch ihre geringe Körpergröße auf, die im Mittel unter 1,50 Meter liegt. Schon seit langer Zeit rätseln Wissenschaftler über die Gründe für diesen Kleinwuchs. Vermutlich ist er die Begleiterscheinung einer starken Immunität gegenüber ansteckenden Krankheiten, so Sarah Tishkoff von der University of Pennsylvania (USA) und ihre Kollegen.

Das Team suchte in den Genomen von 57 Pygmäen aus Kamerun nach charakteristischen Merkmalen, die mit der Körpergröße zusammenhängen. Fündig wurden die Forscher in einer Region von Chromosom 3. Dort liegen Gene, die mit der Funktion des Immunsystems und der Fortpflanzung, aber auch mit dem Körperwuchs zu tun haben. Eines dieser Gene – *CISH* – ist bekannt dafür, dass sein Produkt bestimmte menschliche Wachstumshormone hemmt. Zugleich spielt es eine wichtige Rolle bei der Regulation des Immunsystems und bestimmt darüber mit, wie empfänglich sein Träger gegenüber Krankheiten wie Malaria oder Tuberkulose ist, die in Afrika grassieren.

Damit sei der Kleinwuchs möglicherweise die Folge eines starken Selektionsdrucks, der auf eine hohe Widerstandsfähigkeit gegen Infektionen hinwirke, schreiben die Autoren. Tatsächlich sind Pygmäen fortlaufend intensiven Attacken durch Krankheitserreger ausgesetzt. Ihre durchschnittliche Lebenserwartung zählt mit 16 bis 24 Jahren zu den kürzesten bei Menschen überhaupt.

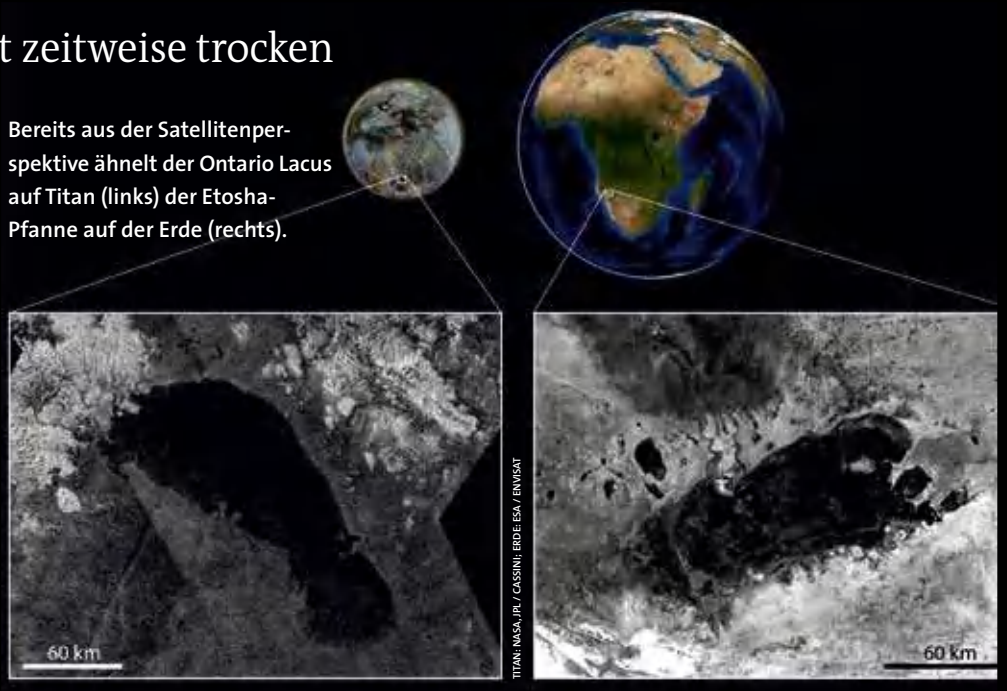
PLoS Genetics 8, e1002641, 2012

EWAN LEACH

Eine Gruppe von Pygmäen zusammen mit einem der beteiligten Forscher.

ASTRONOMIE

Riesensee auf Titan fällt zeitweise trocken



Bereits aus der Satellitenperspektive ähnelt der Ontario Lacus auf Titan (links) der Etosha-Pfanne auf der Erde (rechts).

Der Saturnmond Titan gilt als erdähnlichster Himmelskörper im Sonnensystem. Auf ihm finden sich Phänomene, die an den irdischen Wasserkreislauf erinnern. So gibt es dort Wolken, Regen, Flüsse und Seen – allerdings nicht aus Wasser, sondern aus Kohlenwasserstoffen wie Methan, Ethan und Propan. Der größte See auf dem südlichen Titan, »Ontario Lacus«, hat eine Fläche von rund 15 000 Quadratkilometern. Wie nun Forscher um Thomas Cornet von der Université de Nantes in Frankreich berichten, gleicht dieser See den zeitweise trockenfallenden Salzgewässern, die etwa in Afrika zu finden sind.

Auf Radar-, Spektrometer- und Infrarotaufnahmen, welche die Saturnsonde Cassini zwischen 2007 und 2010 eingefangen hatte, sind durchgängig Kanäle auf dem Grund des Ontario Lacus erkennbar. Die französischen Forscher gehen davon aus, dass der Boden dort in dieser Zeit trockenlag. Zudem fanden sie Sedimente in der Umgebung des Sees – dessen Oberfläche muss also früher einmal höher gelegen haben als zum Zeitpunkt der Aufnahmen.

Ein solch wechselnder Pegelstand ist auch von irdischen Gewässern bekannt. So füllt sich die Etosha-Pfanne in Namibia immer nur vorübergehend mit Wasser, das aus dem Untergrund aufsteigt. Verdunstet es später wieder, bleibt eine so genannte Salztonebene zurück. Die Forscher vermuten, dass im Ontario Lacus der gleiche Vorgang abläuft, jedoch mit Kohlenwasserstoffen.

ESA-Pressemitteilung, 19. 4. 2012

MEDIZINTECHNIK

Neues Netzhautimplantat für Blinde

Bei Patienten, die wegen einer Netzhautdegeneration erblinden, gehen die lichtempfindlichen Sinneszellen zu Grunde; andere Neurone der inneren Netzhautschichten bleiben jedoch oft intakt. Das ermöglicht es, das Sehvermögen mit Netzhautimplantaten wiederherzustellen. Diese künstlichen Fotorezeptoren schicken Signale an die noch funktionierenden Zellen und produzieren so zumindest schemenhafte Abbilder der Umwelt. Ein neuer Ansatz verspricht nun, die Leistung solcher Implantate deutlich zu verbessern.

Daniel Palanker von der Stanford University und sein Team wollen winzige Fotodioden in die Netzhaut einpflanzen, die Licht in elektrischen Strom umwandeln. Eine spezielle Brille nimmt dann die Umgebung mit einer eingebauten Kamera auf und projiziert die Bilder über gepulstes Nahinfrarot-(NIR-)Licht ins Auge. Dort fällt es auf die implantierten Fotodioden und erzeugt in ihnen elektrische Impulse, die an die inneren Netzhautschichten weitergegeben werden.

Der Vorteil dieser Methode ist, dass die NIR-Pulse sowohl die Bildinformationen als auch die benötigte Energie für die Fotodioden übermitteln. Dadurch entfallen Spulen und Kabel wie bei bisherigen Implantaten, die viel Platz beanspruchten. Beim neuen System lassen sich die Fotorezeptoren stärker miniaturisieren und dadurch mehr von ihnen einpflanzen – die Zahl künstlicher Pixel steigt und somit die erreichbare Bildauflösung.

Bei ersten Experimenten mit Netzhaut-Gewebekulturen von Ratten hat sich das System bereits bewährt. Die Stanforder Forscher planen weitere Verbesserungen, etwa flexible Implantate, die sich an die Rundung des Augapfels anpassen. Diese könnten eine größere Fläche abdecken und das Gesichtsfeld erweitern.

Nature Photonics 10.1038/nphoton.2012.104, 2012

MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de

Aktuelle Spektrogramme
finden Sie täglich unter

www.**spektrum.de**/spektrogramm

BIOLOGIE

Pilzparasit hält Ameisenparasit in Schach

Der Pilz *Ophiocordyceps camponoti-rufipedis* nutzt eine perfide Taktik zur Fortpflanzung: Er veranlasst befallene Ameisen dazu, ihre Kolonien zu verlassen und zu regelrechten Massengräbern zu pilgern. Dort erliegen die Tiere dem Parasiten, der sich anschließend weiter verbreitet. Trotz dieser ausgeklügelten Strategie löscht der Pilz jedoch nur selten ganze Kolonien aus – offenbar, weil er seinerseits von »hyperparasitären« Pilzen dezimiert wird.

Dies zeigte sich, als David P. Hughes von der Penn State University (USA) und seine Kollegen den Reproduktionszyklus von *O. camponoti-rufipedis* untersuchten. Dabei stützten sie sich auf Feldstudien in Thailand und Brasilien. Ist eine infizierte Ameise gestorben, wächst der Pilz aus dem Kopf des Insekts heraus und bildet einen Fruchtkörper. Dieser sondert nach etwa vier Wochen Sporen ab, die weitere Tiere infizieren. Allerdings produzieren nur wenige Prozent der Fruchtkörper Sporen, wie die Forscher herausfanden. Daran sind vor allem die Hyperparasiten schuld – andere Pilzarten, die *O. camponoti-rufipedis* befallen und unfruchtbar machen.

Besonders anfällig dafür scheint der Ameisenparasit zu sein, bevor seine Fruchtkörper ausgereift sind. Jeder funktionierende Fruchtkörper jedoch bringt bei den von ihm infizierten Ameisen im Schnitt wieder einen hervor. Dadurch bleibe die Pilzpopulation langfristig stabil, so die Forscher.

PLoS One 7, e36352, 2012

DAVID P. HUGHES, PENNSYLVANIA STATE UNIVERSITY

Aus dem Kopf einer toten Ameise, die ihrer Infektion erlegen ist, wächst der Ameisenpilz heraus. Auf ihm wiederum gedeiht ein weiterer Pilz, der den Ameisenpilz sterilisiert. Nach den Befunden der Forscher kommen solche »Hyperparasiten« häufig vor: Sie lassen sich bei mehr als der Hälfte der Insektenkadaver nachweisen.

ARCHÄOLOGIE

Südeuropäer brachten Ackerbau nach Skandinavien

Vor etwa 6000 Jahren begannen Menschen in Nordeuropa damit, Ackerbau und Viehzucht zu treiben. Laut neuen Untersuchungen handelte es sich bei ihnen möglicherweise um Einwanderer aus dem Süden, wo die Landwirtschaft bereits zuvor Fuß gefasst hatte. Diese zugezogenen Bauern scheinen mehr als 1000 Jahre lang neben einheimischen Jägern und Sammlern gelebt zu haben, bis sie sich mit ihnen zu vermischen begannen.

Pontus Skoglund von der Universität Uppsala (Schweden) und seine Kollegen untersuchten DNA aus 5000 Jahre alten menschlichen Überresten. Das Material stammt von drei Individuen der so genannten Grübchenkeramischen Kultur (Jäger und Sammler) und einem Angehörigen der Trichterbecherkultur (Bauern). Alle vier lebten in Skandinavien. Beim Vergleich ihrer DNA-Sequenzen mit dem Erbgut heutiger Europäer zeigte sich, dass die Jäger und Sammler am ehesten den heutigen Nordeuropäern ähnelten, speziell Finnen und Russen. Der Bauer hingegen wies davon deutlich abweichende Sequenzen auf; er glich genetisch den heutigen Südeuropäern, insbesondere Italienern.

Beide Kulturen hatten sich vor 5000 Jahren offenbar kaum durchmischt, obwohl die Überreste der Individuen nur etwa 400 Kilometer voneinander entfernt gefunden wurden. Jedoch scheint diese Isolation später aufgebrochen zu sein: Heutige Europäer sind genetisch sowohl von Bauern als auch von Jägern und Sammlern der Jungsteinzeit geprägt, wie die Ergebnisse zeigen. Zusammengenommen sprechen die Befunde laut den Forschern dafür, dass Wanderbewegungen, die von Südeuropa ausgingen, die Landwirtschaft in den Norden brachten.

Science 336, S. 466–469, 2012

GÖRAN BURENHULT, GOTLAND UNIVERSITY COLLEGE

Skandinavische Forscher präparieren das Skelett eines jungsteinzeitlichen Jägers und Sammlers an einer Ausgrabungsstätte auf Gotland. Genetisch ähnelte er am ehesten den heutigen Finnen und Russen.

DAVID JONES AND MARK PURNELL, UNIVERSITY OF LEICESTER

MODERNES GOLDWASCHEN

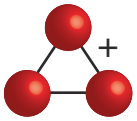
Nur stecknadelkopfgroß und 300 Millionen Jahre alt: der winzige Zahn eines ausgestorbenen Urzeittiers (Conodonten). Der aufgedampfte Goldfilm sorgt dafür, dass feinste Oberflächendetails im Rasterelektronenmikroskop sichtbar werden. Um den Metallüberzug wieder zu entfernen, ohne das wertvolle Objekt zu beschädigen, werden bislang meist giftige Zyanide eingesetzt. Forscher um Mark Purnell von der University of Leicester haben nun eine kostengünstige, ungiftige und einfache Alternative gefunden: ionische Flüssigkeiten. Ein Tauchbad aus einer Mischung von Cholinchlorid, Ethylenglykol und darin gelöstem Jod entfernt die Goldhülle rückstandsfrei und ohne Folgen für die Proben.

Palaeo. Electronica 15, 15.2.4T, 2012

QUANTENCHEMIE

Dreiatomiger Wasserstoff in interstellaren Wolken und auf der Erde

Im Weltall bildet das Molekül H_3^+ den Ausgangspunkt vielfältiger chemischer Reaktionen. Doch auf der Erde ist dreiatomiger Wasserstoff ein Exot, der sich nur mit raffinierten Tricks im Labor fabrizieren lässt. Seine Eigenschaften werden erst allmählich in allen Details entschlüsselt.



VON ANDREAS WOLF

Wasserstoff ist das bei Weitem häufigste Element im Universum, gefolgt von Helium, Sauerstoff und Kohlenstoff. Deshalb beginnt die Chemie des Kosmos mit der Bildung von Wasserstoffmolekülen. Sie sammeln sich in interstellaren Molekülwolken, den chemischen Kinderstuben für Sterne und Planeten. Woher wissen wir das? Mit irdischen und satellitengestützten Observatorien erschließen Astronomen die Zusammensetzung der interstellaren Materie aus der Intensität und Wellenlänge der ausgesandten Strahlung. Das Spektrum vieler Atome und Moleküle ist so gut bekannt, dass es sie verrät wie ein Fingerabdruck. Die zum Teil kompliziert gebauten Moleküle in interstellaren Wolken machen sich im Strahlungsspektrum durch ihre Schwingungen und Rotationen bemerkbar.

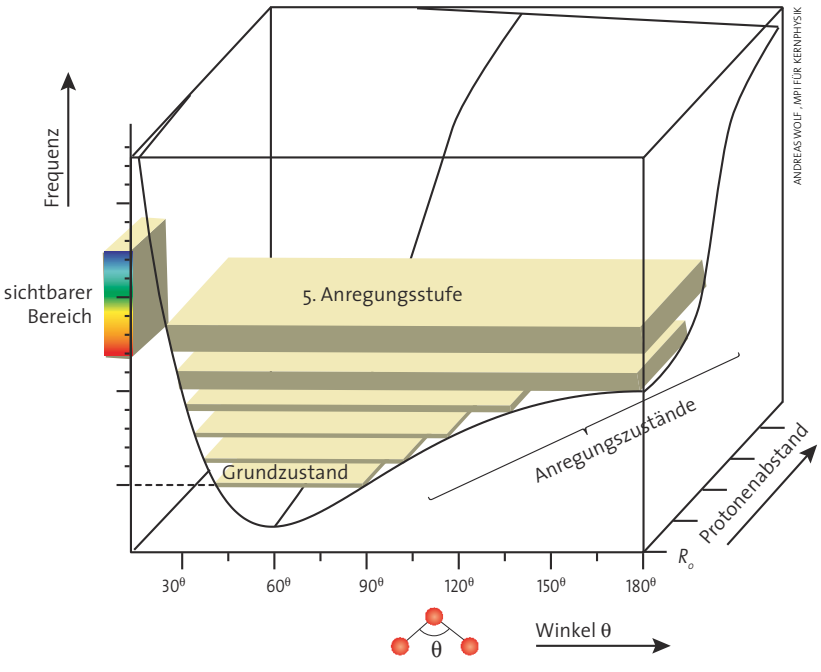
Molekülwolken arbeiten als chemische Fabriken, obwohl sie zu den kältesten Orten im Universum gehören und um viele Größenordnungen weniger dicht sind als die Erdatmosphäre. Unter solchen Bedingungen können Reaktionsketten nur in Gang kommen, wenn die kosmische Strahlung – oder die Strahlung naher Sterne – zunächst einige der üblichen zweiatomigen Wasserstoffmoleküle H_2 ionisiert, indem sie ein Elektron abtrennt. In einer ersten Reaktion verwandelt sich dann das ionisierte Molekül H_2^+ in das dreiatomige Wasserstoffion H_3^+ – den Hauptakteur der nachfolgenden Reaktionsketten. Dessen spektroskopischer Fingerabdruck konnten vor Kurzem mehrere Teams aus experimentellen und theoretischen Physikern mit bisher unerreichter Genauigkeit identifizieren.

Drei Protonen in ihrer Potenziallandschaft

Das dreiatomige Wasserstoffion ist eines der einfachsten Moleküle. Es enthält wie neutraler Wasserstoff H_2 zwei Elektronen, aber drei Protonen. Die fünf Teilchen sind durch ihre elektrischen Anziehungskräfte stabil anein-

Wie das Molekül schwingt

Die Potenzialfläche des dreiatomigen Wasserstoffions H_3^+ – hier stark vereinfacht dargestellt – hängt vom mittleren Abstand der Protonen und vom Winkel zwischen ihnen ab. Die horizontalen Ebenen zeigen die Energiebereiche, in denen angeregte Schwingungszustände der Protonen liegen. Im tiefsten Zustand mit Protonenabstand R_o bilden die Wasserstoffatome annähernd ein gleichseitiges Dreieck. Die Anregungsenergie und die zugehörige Strahlungsfrequenz nehmen nach oben zu. Ab der vierten Anregungsstufe wird der Winkel zwischen den Protonen durch das Potenzial nicht mehr begrenzt – das H_3^+-Molekül verformt sich beim Schwingen teils stark. Die Übergänge in die fünfte Anregungsstufe erreichen den sichtbaren Teil des Spektrums.



ESA / NASA, JPL / CALTECH / HI-GAL

Diese molekulare Wolke in der Nähe des Zentrums der Milchstraße wurde mit dem 2009 von der Europäischen Weltraumbehörde ESA gestarteten Satellitenteleskop Herschel aufgenommen.

ander gebunden, wobei die Protonen ein gleichseitiges Dreieck bilden. Alle Komponenten bewegen sich nach den Gesetzen der Quantenmechanik. Allerdings zählt H_3^+ bereits zu den Vielteilchensystemen, die sich nicht einmal mit Supercomputern in allen Details erfassen lassen. Darum sind die Quantenchemiker auf Näherungsmethoden angewiesen, deren Zuverlässigkeit sie letztlich durch genaue Messungen bestätigen müssen.

In der Sichtweise der Quantenchemie bewegen sich die Protonen auf einer Potenzialfläche; diese beschreibt die bindende Wirkung der Elektronenhülle und gleicht einer hügeligen Landschaft. Die Protonen schwingen um ihre Gleichgewichtslagen und können sich bei zunehmender Anregungsenergie weit davon entfernen, ohne ganz aus dem Molekülverband zu entweichen. Ähnlich wie bei den Eigenfrequenzen einer schwingenden Saite erlaubt die Quantenmechanik für angeregte Molekülzustände nur bestimmte Schwingungen, die von der Form der Potenziallandschaft abhängen. Wird zusätzlich die Rotationsbewegung des Moleküls einbezogen, so ergeben sich die Frequenzen, bei denen es Strahlung aussenden und absorbieren kann – das charakteristische Molekülspektrum.

Im Infrarotbereich, der energieschwachen Schwingungen in der Nähe des Gleichgewichts entspricht, ist das Spektrum seit Längerem präzise vermessen und auch theoretisch gut verstanden. Anders bei höheren Anregungsfrequenzen, die in den Bereich sichtbaren Lichts hineinreichen: Hier durchstreifen die Protonen weniger bekannte Bereiche der Potenziallandschaft und ordnen sich in praktisch jeder denkbaren Form an – etwa als flaches oder spitzes Dreieck oder nahezu linear. Da hier große Unsicherheit bezüglich der Schwingungen herrscht, können nur gezielte Experimente weiterhelfen.

Im Labor lassen sich derartige Molekülionen mit Gasentladungen erzeugen. Zahlreiche Messungen an H_3^+ sind dem Chemiker und Astronomen Takeshi Oka von der University of Chicago zu verdanken, der solche Entladungen mittels hochempfindlicher Laserspektroskopie untersucht hat. Seine Forschungsgruppe wies 1980 das Spektrum von H_3^+ im Labor nach, entdeckte das H_3^+-Ion 1996 im interstellaren Raum und fand es 2005 in großen Mengen nahe dem Zentrum unserer Milchstraße.

Kalt wie im Weltall

Okas Laborspektren von H_3^+ enthalten lange Serien von Spektrallinien, in denen sich Schwingung und Rotation der Moleküle überlagern. Das ist eine Folge der relativ hohen Temperatur in der Gasentladung und schwächt die Intensität der einzelnen Linien. Daher überstrichen die Messungen zwar den Infrarotbereich bis nahe an die Grenze des sichtbaren Lichts, aber Spektrallinien höherer Frequenz waren nicht mehr nachweisbar. Seit einiger Zeit haben Forscher erkannt, dass tiefe Temperaturen – wie sie auch in den meisten interstellaren Wolken herrschen – hier den entscheidenden Fortschritt bringen. Kalte Molekülionen besetzen nur die tiefsten Energiezustände der Rotation und zeigen daher wenige, aber dafür intensivere Spektrallinien.

Ionenfallen und Speicherringe sind ideale Werkzeuge, um ionisierte Moleküle mit Hilfe ihrer Ladung in elektrischen oder magnetischen Feldern fest-

OLDRICH NOVOTNY, MPI FÜR KERNPHYSIK

Die erste Multipol-Ionenfalle zur Speicherung von kalten Molekülionen mit Hilfe von elektromagnetischen Hochfrequenzfeldern baute Dieter Gerlich an der Universität Freiburg. Das Bild zeigt die am Max-Planck-Institut für Kernphysik weiterentwickelte Anordnung, die für die Messungen an H_3^+ verwendet wurde.

zuhalten. Werden sie bei tiefer Temperatur betrieben, verringert sich die innere Energie der Molekülionen bis auf Werte wie in den Tiefen des Weltraums. Die Arbeitsgruppe »Atomare und molekulare Quantendynamik« am Heidelberger Max-Planck-Institut (MPI) für Kernphysik untersucht in einem bis zu zehn Kelvin (Grad über dem absoluten Nullpunkt) kalten Ionenkäfig die chemischen Reaktionen und das Strahlungsspektrum der H_3^+-Ionen. Rund 10 000 Ionen werden dort gekühlt und anschließend mit Lasern unterschiedlicher Frequenz bestrahlt. Wenn die Laserfrequenz zu einer Anregungsfrequenz des Ions passt, wird es in Schwingung versetzt.

Astrophysik im Labor

Um dies nachzuweisen, mischen die Physiker der stark verdünnten Heliumatmosphäre in der Falle etwas Argon bei. Wie Forscher um Dieter Gerlich und Stephan Schlemmer 1999 an der Universität Chemnitz gezeigt haben, können gewisse chemische Reaktionen von Ionen nur dann ablaufen, wenn vorher ihre Schwingungen angeregt wurden – etwa durch Laser. Im Heidelberger Experiment bilden solche laserinduzierten Reaktionen von H_3^+ mit Argon einige wenige Argonhydridionen, die dann sorgfältig gezählt werden. Der Heidelberger Physiker Holger Kreckel machte das Verfahren 2008 konkurrenzfähig mit Okas hochempfindlicher Spektroskopie von H_3^+.

Bei einem Forschungsaufenthalt am MPI für Kernphysik konnte die niederländische Experimentalphysikerin Annemieke Petrignani zusammen mit ihrem Heidelberger Doktoranden Max Berg diese Technik kürzlich weiterentwickeln, um erstmals sichtbare Spektrallinien von H_3^+ aufzufinden. Obwohl die entsprechenden Molekülschwingungen weit in kaum bekanntes Terrain der H_3^+-Potenzialfläche reichen und daher nur ungenau vorhergesagt werden konnten, entdeckten die Forscher in monatelangen Messungen sechs dieser extrem schwachen Linien.

Davon angespornt taten sich theoretische Physiker weltweit zusammen, um die Berechnungen in diesem unsicheren Bereich der H_3^+-Potenzialfläche zu verbessern. Forscher der University of Arizona in Tucson optimierten ihre Rechenverfahren und bestimmten mit Supercomputern eine viel präzisere Potenzialfläche, während Kollegen am University College London und in anderen europäischen Teams die kollektive Bewegung von Elektronen und Protonen in H_3^+ modellierten. Die berechneten Schwingungen – der spektroskopische Fingerabdruck des H_3^+ – passen zu den neuen Labormessungen bis fast auf eine Linienbreite genau. Damit liefern die von den experimentellen und theoretischen Physikern kürzlich gemeinsam berichteten Ergebnisse Erkennungsmarken des Moleküls bei Frequenzen bis weit in den sichtbaren Spektralbereich hinein *(Physical Review Letters 108, 023002, 2012)*.

Neben Ionenfallen verwenden Forscher am Heidelberger MPI für Kernphysik auch Speicherringe, um Reaktionen der Molekülionen mit geladenen oder neutralen Partnern zu untersuchen. Sie weisen die Produkte dieser Prozesse dabei als Teilchen nach und analysieren sie nach ihren Impulsen und Massen, um so eine Vielzahl interstellarer Reaktionen zu charakterisieren.

Die geschilderten Resultate sind ein schönes Beispiel für das Zusammenwirken von astronomischer Beobachtung und Laborversuch. Im ionisierten interstellaren Medium steht das Schlüsselion H_3^+ am Anfang langer Reaktionsketten hin zu Wasser, Kohlenwasserstoffen und zu Verbindungen mit Stickstoff und anderen Elementen. Deren Bedeutung für die Stern- und Planetenentstehung untersuchen Astronomen mit neuesten Observatorien und Satelliten. Die Analyse dieser Beobachtungen ist aber auf theoretische Modelle der molekularen Spektren und Reaktionen angewiesen, die im Labor an kalten Molekülen und ihren Ionen getestet werden.

Andreas Wolf leitet den Forschungsbereich »Molekulare Quantendynamik und gespeicherte Ionenstrahlen« in der Abteilung »Gespeicherte und gekühlte Ionen« am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg.

PRIMATENEVOLUTION

Die Geburt der Paarbeziehung

Vor rund 50 Millionen Jahren fanden sich die ersten Primaten zu lockeren Gruppen zusammen. Bald kamen größere feste Verbände auf. Erst aus diesen entstanden Haremsstrukturen und Paare.

VON JOAN B. SILK

Neue Thesen zur Menschenevolution finden stets ein Medienecho, sei es über Fossilien oder Genomanalysen. Noch mehr dürfte aber interessieren, wie unsere Vorfahren einst lebten und miteinander umgingen. Nun gewannen drei Forscher der University of Oxford unerwartete Erkenntnisse über die Evolution der sozialen Strukturen bei Primaten *(Nature 479, S. 219–222, 2011)*. Die Anthropologen Susanne Shultz, Christopher Opie und Quentin D. Atkinson liefern damit zugleich Hinweise auf den Ursprung der Paarungssysteme der Hominiden.

Über die Sozialstrukturen von heutigen Primatenarten ist bereits eine Menge bekannt: Es gibt nur wenige Spezies, darunter einige Lemuren, bei denen die erwachsenen Tiere zeitlebens weit gehend Einzelgänger bleiben und Artgenossen hauptsächlich zur Paarung treffen – sowie an den Grenzen ihrer Reviere, die sie mit lauten Rufen markieren. Die anderen Arten leben in kleineren oder größeren, oft festen Verbänden: Gorillagruppen etwa bestehen aus einem erwachsenen Männchen, mehreren Weibchen und deren Nachwuchs; Paviane treten in größeren Gruppen auf, denen jeweils mehrere bis viele Erwachsene beider Geschlechter angehören. Gibbons leben monogam in dauerhaften Paaren mit ihrem Nachwuchs.

Shultz und ihre Kollegen wollten herausfinden, inwieweit sich die einzelnen sozialen Organisationen von den Evolutionslinien her erklären lassen und ob sich bestimmte Entwicklungsmuster finden. Zu dem Zweck haben sie Angaben zu Sozialstrukturen von 217 heutigen Primatenarten mit deren evolutionären Verwandtschaftsbeziehungen in Verbindung gebracht, die Systematiker aus genetischen Verglei-

www.spektrum.de/aboplus

Der Premiumbereich – exklusiv für Abonnenten von **Spektrum der Wissenschaft**

SDW ABOPLUS

Jahresabonnenten von **Spektrum der Wissenschaft** profitieren nicht nur von besonders günstigen Abokonditionen, exklusiv auf sie warten unter www.spektrum.de/aboplus auch eine ganze Reihe weiterer hochwertiger Inhalte und Angebote, unter anderem:

- Alle **Spektrum der Wissenschaft**-Artikel seit 1993 im Volltext
- Ein Mitgliedsausweis, dessen Inhaber in zahlreichen Museen und wissenschaftlichen Einrichtungen ermäßigten Eintritt erhält
- Vergünstigte Sonderhefte, kostenlose Downloads und das Produkt des Monats zum Spezialpreis
- Ein Preisnachlass beim Bezug von Spektrum.de-Premium, mit unserer wöchentlichen Digitalzeitung »Die Woche«

Produkt des Monats

Spektrum DER WISSENSCHAFT Wissenschaft aus erster Hand

www.spektrum.de/aboplus

chen erschlossen haben. Was dabei herauskam, spricht nach Ansicht der Forscher durchaus für eine starke Verbindung von sozialer Organisation und Phylogenie. Denn offenbar ähneln sich die gesellschaftlichen Strukturen von enger miteinander verwandten Primatenarten mehr, als es zu erwarten wäre, wenn die Abstammung hierfür keine wesentliche Rolle spielte.

Bei ihrer Studie ermittelten die Forscher zudem, in welcher Reihenfolge sich die unterschiedlichen Lebensformen bildeten. Dabei fanden sie Überraschendes: Naheliegend wäre, dass auf Einzelgängertum zunächst paarweises Leben folgte – indem Männchen und Weibchen ihre Zusammenkünfte immer mehr zeitlich ausdehnten. Auch könnte man meinen, dass aus kleinen Gruppen nach und nach größere Verbände mit komplexeren Strukturen wurden.

Aber Shultz und ihre Kollegen entdeckten einen ganz anderen Verlauf – und den in ähnlicher Abfolge gleich mehrmals, also bei verschiedenen Abstammungslinien. Demnach formten vor ungefähr 52 Millionen Jahren ursprünglich einzelgängerische Primaten zunächst lockere Verbände, denen eine Anzahl Männchen und Weibchen angehörten. Hieraus entstanden festere Gruppierungen mit mehreren erwachsenen Mitgliedern beider Geschlechter. Und erst dann entwickelten sich vor rund 16 Millionen Jahren Arten, die in festen Paaren oder in Harems lebten. Letzteres bezeichnet Gruppen aus einem erwachsenen Männchen und mehreren Weibchen.

Phylogenie statt Ökologie

Dieser Befund stellt bisherige Modelle in Frage, welche die einzelnen sozialen Organisationsformen der Primaten vorrangig mit ökologischen Zwängen erklären. Nach jener Auffassung erzeugt das jeweilige Nahrungsangebot einen auf die Situation abgestimmten Wettbewerb. Das wiederum bedingt die Muster, wie sich die Tiere räumlich verteilen – und somit, wie sie sich sozial strukturieren. Der phylogenetischen Herkunft messen diese Modelle im Allgemeinen wenig Gewicht bei. Allerdings erkennen die Forscher zunehmend, dass die Evolutionsgeschichte für soziale Strukturen doch einige Bedeutung hat. Die neue Studie bestärkt diese Sichtweise.

Bei ihrer Analyse fragten die Oxforder Wissenschaftler nicht nach den Selektionskräften, die auf die Organisationsformen einwirkten. Immerhin zeigen sie aber auf, dass der anfängliche Wechsel vom Einzelgängertum zum Leben in Verbänden zu der Zeit stattfand, als Primaten vom Nachtleben zur Tagaktivität übergingen. Bei Dunkelheit können sich Tiere gut mit unauffälligem Verhalten vor Fressfeinden schützen – also insbesondere, indem sie allein umherstreifen. Im Tageslicht gewährt womöglich ein Zusammenschluss zu mehreren oder vielen eher Sicherheit.

Die neue Studie erhellt auch, welche Vorteile es bringen kann, dass bei vielen Primatenarten nur Heranwachsende eines Geschlechts ihre Herkunftsgruppe verlassen – bei Schimpansen zum Beispiel Weibchen –, während das andere Geschlecht lebenslang im Ursprungsverband bleibt. Abwanderung ist generell ein Schutzmechanismus gegen Inzucht. Nun kommt hinzu: Die in der alten Gruppe verweilenden Tiere bauen gern untereinander kleine kooperierende Einheiten auf, die etwa bei Rangauseinandersetzungen dienlich sind. Bevorzugt kooperieren sehr nah verwandte Affen. Laut Shultz und ihren Kollegen entstanden die geschlechtsspezifischen Muster bei den Primaten erst, nachdem es bei ihnen schon soziale Einheiten mit jeweils mehreren Männchen und Weibchen gab – nicht vorher. Anzunehmen ist also, dass es nicht die aus Kooperationen erwachsenden Vorteile waren, die ihre Sozialevolution vorantrieben. Vielmehr boten wohl erst die schon vorhandenen stabilen, auch ortsstabilen Strukturen Gelegenheit für solche hilfreichen Freundschaften vor allem mit nah verwandten Geschlechtsgenossen.

Besonderes Interesse erregt der Befund, dass Paare aus größeren stabilen Verbänden mit jeweils mehreren Vertretern beider Geschlechter hervorgingen und nicht umgekehrt – und zwar aus zwei Gründen. Erstens stellt das einige Annahmen zur Verzahnung von sozialer Komplexität und sozialer Intelligenz in Frage, die in der Primatologie in den letzten Jahrzehnten aufkamen. Demnach verlangt das Leben in großen Gruppen wegen der vielen verschiedenen Beziehungen, vor allem dem Umgang mit möglichen Rivalen, dem Verstand eine Menge ab und fördert darum die Evolution des kognitiven Leistungsvermögens. Forscher glaubten bisher, je größer der Verband, desto kompli-

FOTOLIA / STEPHEN MEESE

Bei Primaten waren die komplexen Sozialstrukturen größerer Gruppen die Basis für die Evolution von Paarbeziehungen – nicht umgekehrt.

JA ZU NEUEN TECHNOLOGIEN.

DAMIT WIR MORGEN NICHT VON GESTERN SIND.

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

WIRTSCHAFT.
WACHSTUM.
WOHLSTAND.

www.bmwi.de/go/innovation

zierter sei das soziale Umfeld und desto mehr käme es auf intellektuelle Raffinesse an. Aber der neuen Arbeit zufolge wächst die soziale Komplexität nicht einfach mit der Gruppengröße.

Zweitens verraten die Ergebnisse auch einiges über unsere eigene Evolution. Vor fünf bis sieben Millionen Jahren dürfte der letzte gemeinsame Vorfahre von Menschen und Schimpansen gelebt haben. Über dessen soziales Verhalten weiß man praktisch nichts, doch es könnte aufschlussreich sein, dass heutige Schimpansen größere feste Gemeinschaften mit jeweils mehreren Erwachsenen beiden Geschlechts bilden. Nach den neuen Analysen ist wenig wahrscheinlich, dass die gemeinsamen Ahnen in kleinen Verbänden mit lediglich einem erwachsenen Paar lebten – denn dann hätten sich die Schimpansenverbände aus festen Paarstrukturen entwickelt, was im Widerspruch zu den entdeckten Entwicklungsmustern stünde. Somit trat das Paarleben in der menschlichen Entwicklungslinie erst nach der Trennung der beiden Evolutionszweige auf.

Joan B. Silk ist Anthropologin und hat eine Professur an der University of California in Los Angeles im Department of Anthropology.

© Nature Publishing Group

www.nature.com
Nature 479, S. 182–183, 10. November 2011

NICHTLINEARE OPTIK

Ein Versteck im Fluss der Zeit

Räumliche Tarnkappen haben Physiker schon mehrfach entwickelt. Nun präsentieren sie ein System, das ein Ereignis in der Zeit verbirgt.

VON ROBERT W. BOYD UND ZHIMIN SHI

Siegfried, der viel besungene Held des Nibelungenlieds, verfügte dem Mythos zufolge über ein ganz besonderes Kleidungsstück: eine Tarnkappe, die er einem Zwerg namens Alberich abgeknöpft hatte. Mit Hilfe dieser »Kappe«, die eigentlich ein mantelartiger Umhang war, wurde der Sagenheld unsichtbar, so oft er es wünschte. Das Konzept fasziniert bis heute. Seit einigen Jahren experimentieren Physiker darum mit Vorrichtungen, die Gegenstände unsichtbar machen.

Wie kann man sich eine solche Tarnkappe vorstellen? Sie umhüllt das zu verbergende Objekt, wobei ihr Material besondere optische Eigenschaften besitzt. Wichtig ist vor allem der Brechungsindex. Er sorgt dafür, dass ein Lichtstrahl an der Grenzfläche zwischen zwei Medien eine mehr oder weniger starke Richtungsveränderung erfährt. Insbesondere muss der Brechungsindex innerhalb des Kappenmaterials so variieren, dass ein auf die Kappe fallender Lichtstrahl um sie herumgeleitet wird. Der Beobachter soll den Eindruck erhalten, der Strahl wäre durch die Kappe hindurchgedrungen, ohne dabei auf ein Hindernis zu treffen.

Längst sind solche Tarnkappen nicht nur dem Reich der Mythen, sondern auch der Theorie entwachsen. Ihre experimentelle Realisierung ist eng mit optischen Metamaterialien verknüpft. Das sind künstlich hergestellte Werkstoffe, deren optische Eigenschaften sich in einem weiten Bereich relativ frei wählen lassen. Beispielsweise können sie, anders als so gut wie alle natürlich vorkommenden Materialien, negative Brechungsindizes aufweisen. Schon mehrfach stellten Forscher funktionsfähige Tarnkappen auf Basis von Metamaterialien vor, wenn auch jeweils nur für Spezialfälle – sie funktionieren beispielsweise im sichtbaren Licht, bei infraroten Wellenlängen sowie im Mikrowellenbereich (siehe unter anderem »Moderne Tarnkappe« in SdW 3/2007, S. 16).

Im vergangenen Jahr wurde das Tarnkonzept nun auch auf die Dimension der Zeit ausgedehnt, und zwar zunächst durch eine theoretische Arbeit. Britische Forscher um Martin McCall vom Londoner Imperial College zeigten, dass in einer Lichtwelle eine »zeitliche Lücke« entstehen kann. Dazu müssen die Forscher einen Lichtstrahl trickreich manipulieren. Sie schneiden ihn an einer Stelle gewissermaßen durch und beschleunigen den vorderen Teil, den hinteren bremsen sie ab. Verändert wird hierbei allerdings nur die so genannte Gruppengeschwindigkeit des Lichts (siehe »Der Licht-Turbo«, Spektrum der Wissenschaft 2/2012, S. 48); die von Einstein postulierte Obergrenze für die Lichtgeschwindigkeit wird nicht verletzt. So entsteht eine Lücke im Lichtstrahl. Jedes Ereignis, das innerhalb dieser Lücke geschieht, wirkt sich nicht auf den Strahl aus und ist für den, der ihn registriert, »verschwunden«.

Die Lücke würde aufmerksame Beobachter allerdings argwöhnen lassen, dass jemand am zeitlichen Verlauf des Systems herumgedoktert haben könnte. Doch sie lässt sich auch wieder schließen: Das zuvor beschleunigte Licht wird wieder verlangsamt und das verlangsamte Licht wieder beschleunigt. Sobald die derart »reparierte« Wellenfront einen Beobachter erreicht, nimmt er ein kontinuierliches, gleichmäßiges Lichtfeld war; jeder Hinweis auf die Manipulation ist getilgt.

Dieser Grundgedanke ergibt sich zumindest aus einer Reihe mathematischer Überlegungen im Rahmen der

nichtlinearen Optik. Dass er mehr als blanke Theorie ist, demonstrierten nun Moti Fridman und seine Kollegen von der Cornell University im US-Bundesstaat New York. Für ihr Experiment verwenden die Forscher so genannte Zeitlinsen, die Lichtstrahlen zeitlich stauchen oder dehnen können. Genauer gesagt benutzen die Cornell-Physiker geteilte Zeitlinsen. In den zwei »Hälften« einer geteilten Zeitlinse erfährt Licht jeweils entgegengesetzte Farbverschiebungen: Aus der einen Hälfte tritt also blauverschobenes, aus der anderen Hälfte rotverschobenes Licht aus. Ersteres besitzt eine kleinere, letzteres eine größere Wellenlänge als das ursprüngliche grüne Licht.

Anschließend lassen die Forscher das Licht durch eine spezielle optische Faser laufen, in der sich die Gruppengeschwindigkeit abhängig von der Wellenlänge verändert. Durch diese so genannte Dispersion wird das blauere Licht gegenüber dem ursprünglichen beschleunigt, das rötere verlangsamt. So öffnet sich für einen sehr kurzen Zeitraum von rund 50 Pikosekunden (50 billiardstel Sekunden) eine Zeitlücke. Diese schließen die Forscher anschließend wieder nahtlos, indem sie ein zweites, nun entgegengesetzt wirkendes Dispersionsmedium und eine weitere geteilte Zeitlinse einsetzen. Ein- und ausschalten lässt sich die Tarnkappe mit Hilfe von Lasern, die auf die Linsen gerichtet werden und deren Funktion beeinflussen.

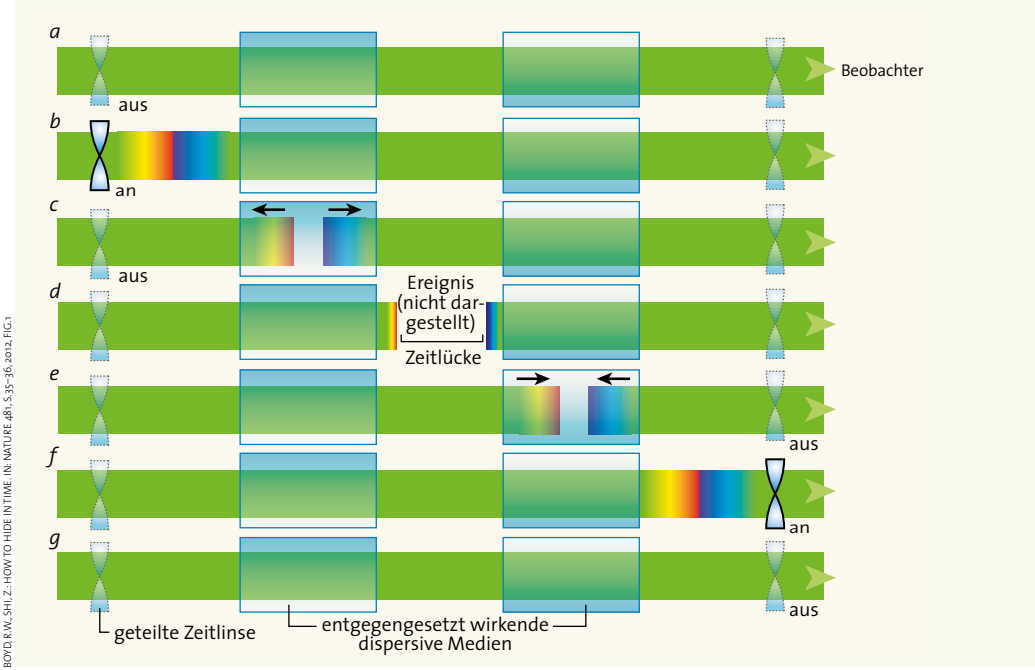
Präzise durch die Zeitlücke

Zum Nachweis, dass ihre zeitliche Tarnkappe funktioniert, schickte das Physikerteam einen Lichtpuls durch ihren Versuchsaufbau – genau in der Mitte der Zeitlücke. Bei ausgeschalteter Tarnkappe erzeugte dieser durch Wechselwirkung mit dem manipulierten Lichtfeld ein Signal mit einer Wellenlänge von exakt 1,539 milliardstel Meter. Schalteten die Forscher die Kappe jedoch ein, konnten sie dieses Signal weit gehend zum Verschwinden bringen: Seine Stärke fiel auf weniger als ein Zehntel des Ursprungswerts ab, das Signal war praktisch verhüllt. Der die Tarnkappe durchquerende Lichtstrahl, so zeigten die Physiker ebenfalls, trat anschließend nahezu unverändert aus dem System aus.

Den Unterschied zwischen zeitlichen und räumlichen Tarnkappen verdeutlichen zwei Analogien aus dem Verkehr. Das Prinzip der zeitlichen Kappe erinnert an einen Bahnübergang: Nähert sich der Zug und schließen sich deshalb die Schranken, wird der Verkehrsfluss auf der Straße gestoppt – eine Lücke im Strom der Autos ist die Folge. Wenn sich später die Schranken wieder öffnen, beschleunigen die Fahrer und setzen ihre Fahrt fort. Sobald sie zu den Autos vor ihnen aufgeschlossen

So funktioniert die zeitliche Tarnkappe

Ein kontinuierlicher grüner Lichtstrahl durchquert das System von links nach rechts *(a)*. Die erste Zeitlinse wird eingeschaltet. Bei einem Teil des ursprünglichen Lichts vergrößert sie die Wellenlänge (Farbe) und verringert sie beim anderen Teil *(b)*. Das modifizierte Licht bewegt sich durch ein dispersives Medium, das die Lichtgeschwindigkeit je nach Farbe beeinflusst *(c)*. Das zum Blauen verschobene Licht wird schneller, das zum Roten verschobene Licht langsamer als das ursprüngliche Grün. Die Folge: Es öffnet sich allmählich eine Zeitlücke. Nun ist die Zeitlücke maximal geöffnet *(d)*. Innerhalb der Lücke wird ein »Ereignis« erzeugt (nicht gezeigt). Bei ausgeschalteten Zeitlinsen würde es mit dem grünen Strahl wechselwirken und ein Signal bei einer bestimmten Wellenlänge entstehen lassen. Sind die Linsen eingeschaltet, kommt es nicht zu einer Wechselwirkung; das Signal lässt sich nicht nachweisen, ist also »verhüllt«. Die Zeitlücke beginnt sich dank eines umgekehrt wirkenden Dispersionsmediums wieder zu schließen *(e)*. Nachdem die Zeitlücke vollständig geschlossen ist, verwandelt eine zweite Zeitlinse alle Farben wieder in Grün *(f)*. Ein Beobachter sieht nur durchgehend grünes Licht *(g)*, ganz so, als ob das Ereignis in *d* nie stattgefunden hätte.



BOYD, R.W., SHI, Z.: HOW TO HIDE IN TIME. IN: NATURE 488, S. 35–36, 2012, FIG. 1

Nebeneffekte der Killerdrohnen

Welche psychologische Wirkung haben fliegende Kriegsroboter?

In Krisenregionen werden immer öfter ferngesteuerte Flugkörper eingesetzt. Solche Drohnen können Gegner nicht nur aufspüren, sondern auch mehr oder weniger gezielt umbringen. Nach Schätzungen der New America Foundation, einer regierungsnahen US-Denkfabrik, haben allein in Pakistan rund 300 Drohneneinsätze seit 2004 zwischen 1785 und 2771 Menschen getötet. Die meisten seien militante Aufständische gewesen, heißt es. Wie die »Kollateralschäden« erfasst wurden, bleibt allerdings zweifelhaft *(Science 336, S. 842–843, 2012)*.

Für die angreifende Seite hat die ferngesteuerte Kriegführung nichts als Vorteile. Die Piloten sitzen ungefährdet in der Nähe ihres Wohnorts, lenken eine tausende Kilometer entfernt operierende Drohne per Satellit vom bodengestützten Cockpit aus und kehren nach getaner Arbeit heim zu Frau und Kindern. Militärpsychologen zufolge leiden sie – ganz anders als Veteranen des Afghanistan- und Irakkriegs – nicht häufiger an posttraumatischem Stress als die Zivilbevölkerung.

Doch wie erlebt die andere Seite den Drohnenkrieg? Offenbar gibt es darüber noch keinerlei Forschung. Das scheint mir – ganz abgesehen von den humanitären Aspekten – schon unter rein konflikttheoretischen Gesichtspunkten ein Manko zu sein, das den Sinn solcher Robotereinsätze in Zweifel zieht.

Für die Vermutung, dass Drohnenangriffe nicht befrieden, sondern Öl ins Feuer gießen, spricht die sozialpsychologische Studie eines kleinen Teams um den Politologen Nicholas Sambanis von der Yale University in New Haven (Connecticut). Die drei Forscher untersuchten die Frage, wie – ganz allgemein – Aufstandsbekämpfung die soziale Einstellung der betroffenen Bevölkerung beeinflusst *(Science 336, S. 805–808, 2012)*. Sind die Menschen froh, die militanten Mitbürger los zu sein, empfangen sie dankbar die Hilfe der Invasoren und leben zukünftig friedlich zusammen?

Weit gefehlt. Der Studie zufolge erhöht Aufstandsbekämpfung die gesellschaftliche Spaltung. Die Autoren verwenden dafür den in der angelsächsischen Sozialforschung gebräuchlichen Begriff Parochialismus, der sich von Parochie für Pfarrei herleitet. Gemeint ist eine enge Kirchturmperspektive, das misstrauische Zusammenrücken in kleinen Gruppen.

Aus den Zuständen in Irak, Afghanistan und Pakistan sowie aus sozialen Spielen im Labor gewannen die Forscher zahlreiche Indizien dafür, dass ein Land, das von außen befriedet werden soll, in ein konfliktreiches Mosaik aus ethnisch und religiös definierten Gruppen zerfällt. So stehen sich zum Beispiel im Irak heute Kurden, Sunniten und Schiiten feindselig gegenüber.

Wenn schon herkömmliche Aufstandsbekämpfung Unfrieden schürt – bei der immerhin Bodentruppen der einheimischen Bevölkerung von Angesicht zu Angesicht begegnen, Gespräche suchen und Hilfe anbieten können –, wie müssen dann erst unsichtbare Luftschläge wirken, die buchstäblich als Blitze aus heiterem Himmel niedergehen?

Wie gesagt: Mangels einschlägiger Untersuchungen ist die psychologische Wirkung von Drohnenangriffen vorerst noch unbekannt. Ich vermute, sie erzeugen ein Unmaß an Angst und ohnmächtigem Hass. Dies wiederum dürfte die Betroffenen erst recht in die Arme ethnischer und religiöser Führer treiben, bei denen sie persönlichen Schutz vor der anonymen Bedrohung suchen. Solange der Zusammenhang zwischen Drohnenkrieg und Parochialismus nicht erforscht ist, spricht für fliegende Roboter nichts als die Unverwundbarkeit ihrer Piloten.

Michael Springer

haben, die Lücke also wieder geschlossen ist, kann ein Beobachter des Verkehrsflusses keinerlei Hinweis auf den die Strecke kreuzenden Zug entdecken: Es ist, als habe dieses Ereignis nie stattgefunden.

Im Gegensatz dazu ähnelt die Wirkungsweise einer räumlichen Kappe einem viel befahrenen Autobahnkreuz vom Typ Kleeblatt. Linksabbieger müssen an einer Kreuzung normalerweise warten, bis sich eine Lücke im entgegenkommenden Verkehr auftut. Diese Raumregion können sie aber meiden, indem sie nach rechts auf eine schleifenförmige Abfahrt abbiegen, die sie in einem Dreiviertelkreis in die gewünschte Richtung leitet. Auf diese Weise fließen die Verkehrsströme, als würde die Kreuzung gar nicht existieren.

Räumliche und zeitliche Tarnkappe wirken in jeweils verschiedenen Dimensionen. Es gibt deshalb keinen prinzipiellen Grund, warum beide nicht auch zu einer vollständigen Raum-Zeit-Tarnkappe kombiniert werden könnten. Die Pioniertat der Cornell-Forscher, wenngleich sie bislang nur für eine einzige Frequenz und auch noch nicht perfekt funktioniert, könnte zudem Anwendungen außerhalb des Labors zeitigen, beispielsweise dabei helfen, die Abhörsicherheit faseroptischer Kommunikationstechniken zu erhöhen. Nächste logische Schritte wären die Verlängerung der Wirkungsdauer der Tarnkappe bis hin zu Mikro- oder gar Millisekunden und die Erweiterung ihrer Wirkung auch für den Fall, dass Licht aus unterschiedlichen Raumrichtungen einfällt. Ob den Physikern damit allerdings je Heldentaten gelingen werden, wie sie dem Drachentöter Siegfried nachgesagt werden, bleibt erst einmal abzuwarten.

Robert W. Boyd forscht am Institut für Optik der University of Rochester (Bundesstaat New York) vor allem auf dem Gebiet der nichtlinearen Optik. **Zhimin Shi** gehört als Postdoc zu seinem Team.

© Nature Publishing Group

www.nature.com
Nature 481, S. 35–36, 5. Januar 2012

Es gibt 502.749 Krankenhausbetten. In welchem liegen Sie richtig?

In FOCUS-GESUNDHEIT bündeln wir die Erfahrung unserer Fachredaktion mit der Kompetenz von Experten. Die aktuelle Ausgabe stellt die besten Kliniken zur Behandlung von psychischen Erkrankungen, Krebs, Herz-, Gelenk- und Nervenleiden sowie für Geburtshilfe vor: Hier finden Sie die Top 100 der besten Krankenhäuser Deutschlands.

Außerdem in diesem Heft:
- **Ratgeber:** Wie finde ich die geeignete Klinik für mich?
- **Service:** So kommt man gesund durchs Krankenhaus.
- **Regionalliste:** Die Top-Kliniken in Ihrer Nähe.
- **Reportage:** Unterwegs in Deutschlands bester Klinik.

Jetzt am Kiosk.

FOCUS-GESUNDHEIT gibt es auch unter: Tel. 0180 5 480 1000*, Fax 0180 5 480 1001*, www.focus-gesundheit.de

*€ 0,14/Min. aus dem dt. Festnetz. Aus dem Mobilnetz max. € 0,42/Min.

Ein neuer Weg zu längerem Leben

Forscher haben einen molekularen Mechanismus entdeckt, der das Altern verlangsamt. Medikamente, die ihn aktivieren, könnten zudem Krebs, Diabetes und andere altersbedingte Krankheiten in Schach halten.

Von David Stipp

Jugendlich und gesund ein hohes Alter erreichen – diesen Traum könnte die Medizin in absehbarer Zeit erfüllen.

AG. FOCUS / SPL / CONEVJAY; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

An einem klaren Novembermorgen des Jahres 1964 stach die »HMCS Cape Scott« der Royal Canadian Navy von Halifax (Nova Scotia) in See. Für das 38-köpfige Wissenschaftlerteam an Bord war es der Auftakt zu einer 14-monatigen Expedition zur Osterinsel, die als Spitze eines gewaltigen Vulkans 2200 Meilen westlich von Chile aus dem Pazifik ragt und berühmt für ihre kolossalen Steinstatuen ist. Aufgeschreckt von Plänen zum Bau eines Flughafens, wollten die Forscher unter Leitung des inzwischen verstorbenen Stanley Skoryna, eines unternehmungslustigen Professors von der McGill University in Montreal, die Einheimischen sowie die Flora und Fauna studieren, solange das abgelegene Eiland noch weit gehend unberührt von der modernen Zivilisation war.

Von den Inselbewohnern freundlich empfangen, sammelte Skorynas Team Exemplare von mehreren hundert ungewöhnlichen Pflanzen- und Tierarten und entnahm allen 949 Eingeborenen Blut- und Speichelproben. Doch der größte Schatz schlummerte in einer unscheinbaren Bodenprobe, die Skoryna mit nach Kanada brachte. Darin fand sich ein Bakterium, das eine Substanz mit einer einzigartigen Eigenschaft produziert: Sie erhöht die Lebensdauer.

Hersteller von Anti-Aging-Mitteln führen als angeblichen Beweis für die lebensverlängernde Wirkung ihrer Produkte gerne Daten an, die eine höhere durchschnittliche Lebenserwartung belegen. Doch das ist ein Trugschluss. Die durchschnittliche Lebenserwartung erhöhen nämlich auch Antibiotika oder andere Medikamente, die einen frühzeitigen Tod durch Krankheit verhindern. Mit dem Altern hat das nichts zu tun. Rapamycin hingegen, wie die Substanz von der Osterinsel genannt wurde, dehnt nicht nur die durchschnittliche, sondern auch die maximale Lebensspanne von Labormäusen über die von unbehandelten Tieren aus. Nur das beweist, dass sich tatsächlich der Alterungsprozess bei den Nagern verlangsamt. Bisher hat keine andere Substanz so etwas je bei Säugetieren vermocht. Der Erfolg von Rapamycin bei Labormäusen ist für Gerontologen deshalb vergleichbar mit dem erstmaligen Durchbrechen der Schallmauer in der Luftfahrt. Schon lange wünschen sie nichts sehnlicher als eine einfache Möglichkeit, das Altern hinauszuschieben und nicht nur die Langlebigkeit zu erhöhen; denn damit verzögern sich auf einen Schlag auch all die Gebrechen, unter denen wir mit zunehmendem Alter zu leiden haben, vom grauen Star bis zum Krebs.

Viele Jahre lang glich das Hoffen auf die Entdeckung eines solchen Anti-Aging-Mittels einer Achterbahnfahrt. Als Forscher Ende der 1980er Jahre Genmutationen aufspürten, die bei Tieren die maximale Lebensspanne verlängern, weckte das zunächst hohe Erwartungen. Anlass zu Optimismus gaben auch neue Einblicke in die Wirkungsweise einer Hungerdiät, die denselben lebensverlängernden Effekt hat. Doch trotz dieser viel versprechenden Fortschritte in der Grundlagenforschung blieb die Fahndung nach Substanzen, welche die Grenzen der Lebenszeit von Säugetieren hinausschieben, ohne Erfolg. Zwar verlängerte das Drosseln der Kalorienzufuhr auf ein Niveau, das die Versuchstiere an den Rand des Hungertods brachte, bei Mäusen die Lebenszeit und zögerte zugleich Krebs, Neurodegeneration, Diabetes und andere altersbedingte Krankheiten hinaus. Doch eine derart strenge Diät kommt bei Menschen nicht in Frage.

Vom geheimnisvollen Stoff aus dem Rotwein zum ersten echten Anti-Aging-Mittel

Noch vor wenigen Jahren ruhten die Hoffnungen der Gerontologen auf Resveratrol, dem viel gepriesenen Inhaltsstoff von Rotwein, der teilweise dieselben positiven Wirkungen hat wie eine Kalorienrestriktion. So unterbindet er bei Nagern die lebensverkürzenden Folgen einer sehr fettreichen Diät. Doch spätere Versuche mit normal gefütterten Mäusen machten alle Hoffnungen zunichte. Bei ihnen ließ die Substanz, die vermutlich auf Enzyme aus der Klasse der Sirtuine wirkt, die maximale Lebensspanne nicht steigen.

Diese herbe Enttäuschung wich neuem Optimismus, als 2009 die Ergebnisse der Rapamycin-Studie publik wurden. In drei parallelen Versuchen, finanziert vom National Institute on Aging in Bethesda (Maryland), hatte der bis dahin nur als Zellwachstumshemmer bekannte Wirkstoff die maximale Lebensspanne von Mäusen um durchschnittlich zwölf Prozent verlängert. Tatsächlich waren die Versuchstiere, weil sich die vorbereitenden Untersuchungen verzögerten, zu Beginn des Experiments schon 20 Monate alt, was beim Menschen etwa 60 Jahren entspricht. Deshalb rechneten die Forscher gar nicht mehr mit einem Erfolg. Doch zu ihrem gro-

AUF EINEN BLICK

DEN VERFALL DES KÖRPERS HINAUSZÖGERN

1 Eine Substanz namens **Rapamycin** verlängert die **Lebensspanne** von Mäusen deutlich, indem sie in einen biochemischen Regelkreis eingreift. Wegen erheblicher **Nebenwirkungen** ist sie für gesunde Menschen zur vorsorglichen Einnahme allerdings kaum geeignet.

2 Dennoch beweist sie, dass sich der **Alterungsprozess** bei Säugetieren im Prinzip medikamentös hinauszögern lässt. Den gleichen **lebensverlängernden Effek**t hat übrigens auch dauerhaftes **extremes Fasten**.

3 Beides hemmt das **Wachstum** und die **Teilungsaktivität** von Zellen**.** Dass sich ausgerechnet dadurch die Lebensspanne erhöht, erscheint zunächst paradox. Doch inzwischen gibt es mehrere Erklärungsansätze dafür.

4 Die weitere Erforschung dieser Frage könnte zur Entwicklung von Medikamenten führen, die **altersbedingte Krankheiten** – von Morbus Alzheimer über Krebs bis hin zu Herzversagen – hinauszögern oder mildern und damit auch uns Menschen zu einem längeren Leben verhelfen.

ßen Erstaunen erhöhte Rapamycin die durchschnittliche Überlebenszeit der betagten Mäuse sogar um ein Drittel.

Leider sind die Nebenwirkungen der Substanz zu gravierend, um sie selbst als Anti-Aging-Mittel beim Menschen einzusetzen. Die Suche nach den Gründen für ihren lebensverlängernden Effekt lenkte den Blick der Wissenschaftler jedoch auf einen uralten Mechanismus, der das Altern bei Mäusen sowie anderen Säugetieren und vermutlich auch beim Menschen reguliert. Seine Haupttriebfeder ist ein Protein namens TOR (Abkürzung für target of Rapamycin; Ziel von Rapamycin). Dieser Eiweißstoff und das zugehörige Gen stehen derzeit im Zentrum intensiver Untersuchungen in der Gerontologie wie auch der angewandten Medizin.

Die bisherigen Ergebnisse sind ermutigend. Demnach verringern Maßnahmen, welche die Aktivität der Säugetierversion des Proteins – genannt mTOR, von englisch mammalian TOR – in Körperzellen senken, das Risiko der wichtigsten altersbedingten Leiden. Dazu zählen Krebs, Alzheimersyndrom, Parkinsonkrankheit, Herzmuskelschwäche, Typ-2-Diabetes, Osteoporose und Makuladegeneration. Diese ersten positiven Befunde elektrisieren die Forscher; denn damit zeichnet sich die Möglichkeit ab, mit Medikamenten, die mTOR gezielt und sicher hemmen, das Altern bei Menschen genauso hinauszuzögern, wie das mit Rapamycin bei Mäusen gelungen ist.

Universeller Wachstumshemmer

Es war ein langer Weg bis zur Entdeckung von TORs Einfluss auf die Lebensspanne. Zunächst einmal übergab die Skorina-Expedition ihre Bodenproben an die damaligen Ayerst Laboratories in Montreal. Pharmakologen hatten schon in den 1940er Jahren Spuren von Antibiotika in Bakterien entdeckt, die im Erdreich hausen. Deshalb untersuchten die Ayerst-Forscher auch diese Proben auf antimikrobielle Substanzen.

Im Jahr 1972 gelang es ihnen, einen Hemmstoff für Pilze daraus zu isolieren. Nach Rapa Nui, dem Namen der Einheimischen für die Osterinsel, nannten sie ihn Rapamycin. Doch die ursprüngliche Hoffnung, die Substanz gegen Hefepilzinfektionen einsetzen zu können, zerschlug sich. Als die Wissenschaftler die Eigenschaften von Rapamycin an Zellkulturen und den Immunsystemen von Tieren untersuchten, entdeckten sie allerdings, dass es die Proliferation von Abwehrzellen verhindern kann. Deshalb prüften sie es nun auf seine Eignung als Immunsuppressivum nach der Übertragung von Organen – mit Erfolg: 1999 erteilte die US-Arzneimittelbehörde Rapamycin die Zulassung für Patienten mit Nierentransplantation. Schon den 1980er Jahren hatte sich außerdem herausgestellt, dass die Substanz das Wachstum von Tumoren unterdrückt. Seit 2007 dienen deshalb zwei von ihm abgeleitete Verbindungen – Temsirolimus von Pfizer und Everolimus von Novartis – zur Behandlung verschiedener Krebsarten.

Biologen fanden es faszinierend, dass Rapamycin das Wachstum sowohl von menschlichen als auch von Hefezellen zu hemmen vermag. Demnach sollte es die Wirkung eines Gens unterdrücken, das für die Zellteilung wichtig ist und sich in der Jahrmilliarde, welche die Evolution von den Hefepilzen bis zum Menschen brauchte, fast nicht verändert hat. 1991 gelang es Michael N. Hall und seinen Kollegen an der Universität Basel, diesen uralten Erbfaktor aufzuspüren. Sie entdeckten, dass Rapamycin zwei Gene blockiert, die das Wachstum der Hefe regulieren, und nannten sie TOR1 und TOR2. Drei Jahre später identifizierten mehrere Forscher, darunter Stuart Schreiber von der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) und David Sabatini, inzwischen am Whitehead Institute for Biomedical Research in Cambridge, unabhängig voneinander das menschliche Gegenstück. Auch bei vielen anderen Arten – darunter Würmern, Insekten und Pflanzen – wurden seither TOR-Gene nachgewiesen.

Im Lauf der 1990er Jahre lernten die Forscher immer mehr darüber, welche Rolle das zugehörige Protein in den einzelnen Zellen und im Körper insgesamt spielt. Wie sich zeigte, hängen viele seiner Funktionen letztlich mit dem Altern zusammen. Insbesondere stellte sich heraus, dass TOR als Enzym fungiert, das sich im Zytoplasma mit mehreren anderen Proteinen zu einem Komplex namens TORC1 verbindet. Dieser überwacht eine ganze Reihe von Zellaktivitäten, die mit Wachstum zu tun haben. Daneben gibt es einen zweiten Komplex namens TORC2, dessen Funktion noch relativ unklar ist. Rapamycin beeinflusst vor allem TORC1.

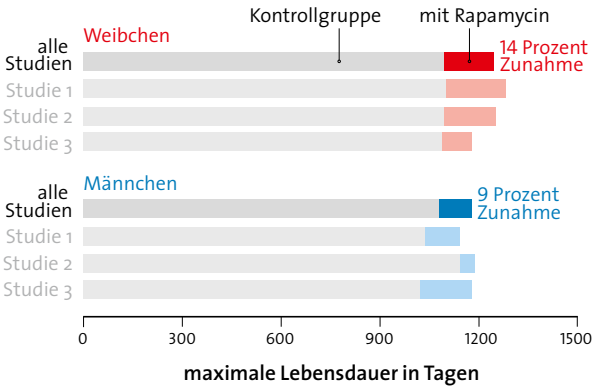
In erster Linie dient TOR als Nährstoffsensor. Bei ausreichend Nahrung verstärkt sich seine Aktivität, woraufhin die Zelle die Proteinproduktion ankurbelt und sich zu teilen beginnt. Unter schlechteren Bedingungen erlahmt TOR. Als Folge davon entstehen weniger neue Proteine, und die Zellteilung kommt zum Stillstand. Gleichzeitig beginnt die Zelle, sich teilweise selbst zu verdauen – ein als Autophagie bezeichneter Vorgang: Sie zerlegt nicht unbedingt benötigte oder defekte Komponenten wie etwa missgestaltete Proteine und nicht richtig funktionierende Mitochondrien, die zelleigenen Kraftwerke. Die Abbauprodukte dienen als Brennstoffe oder Baumaterialien. Neugeborene Mäuse beziehen ihre Energie vor dem ersten Saugen bei der Mutter ausschließlich aus Autophagie.

Forscher machten eine weitere interessante Entdeckung: Bei Tieren sind die Signalwege von TOR und Insulin miteinander gekoppelt. Insulin ist das von der Bauchspeicheldrüse nach Mahlzeiten freigesetzte Hormon, das Muskel- und andere Zellen veranlasst, Glukose aus dem Blut als Energieträger aufzunehmen. Zugleich wirkt es aber auch als Wachstumsfaktor; es selbst und verwandte Proteine tragen dazu dabei, den TOR-Signalweg in Schwung zu bringen, was die Zellen im gesamten Körper als Reaktion auf die Nahrungsaufnahme zu Wachstum und Vermehrung anregt.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Verschränkung zwischen den beiden Signalwegen ist eine negative Rückkopplungsschleife: Die Stimulation von TOR bewirkt, dass Zellen weniger stark auf Insulin ansprechen. Chronisches »Überfressen« führt also zu einer exzessiven TOR-Aktivierung und macht die Zellen so immer unempfindlicher für das Hormon der Bauchspeicheldrüse. Diese »Insulinresistenz« kann ih-

Geschenkte Lebenszeit

Wie 2009 drei parallele Studien an Mäusen zeigten, verlängert eine Substanz namens Rapamycin die maximale Lebensspanne der Tiere, definiert als die durchschnittliche Lebenszeit der ältesten 10 Prozent, um 9 bis 14 Prozent. Dies war das erste Mal, dass eine chemische Verbindung einen solchen Effekt hatte. Aus noch unbekannten Gründen profitierten Weibchen stärker als Männchen.



JEN CHRISTIANSEN; NACH: HARRISON, D.E. ET AL.: RAPAMYCIN FED LATE IN LIFE EXTENDS LIFESPAN IN GENETICALLY HETEROGENEOUS MICE. IN: NATURE 460, S. 392–395, 2009

rerseits hohe Blutzuckerwerte und Diabetes zur Folge haben sowie zu anderen altersbedingten Krankheiten beitragen, beispielsweise zu Verengungen der Herzkranzgefäße.

TOR reagiert aber nicht nur auf Nahrungsmangel, sondern auch auf weitere Belastungssituationen in der Zelle, etwa niedrige Sauerstoffwerte oder Schäden an der Erbsubstanz DNA. Allgemein sinkt bei allen potenziell lebensbedrohlichen Zuständen die TOR-Aktivität, was die Proteinproduktion und Teilungsaktivität drosselt. Die dadurch freigesetzten Ressourcen können in die DNA-Reparatur oder andere Schutzmaßnahmen gesteckt werden. Untersuchungen an Taufliegen zufolge geht in diesem Alarmzustand aber nicht nur die Proteinsynthese insgesamt stark zurück, sondern sie verlagert sich auch: Die Zelle geht dazu über, vor allem wichtige Bausteine der Mitochondrien herzustellen. Möglicherweise dient das der besseren Energieversorgung. Zweifellos entstand diese vielseitige »Stressantwort«, um Zellen für widrige Bedingungen zu wappnen. Ein nicht beabsichtigter Nebeneffekt wäre aber auch, sie gegen den Zahn der Zeit abzuhärten.

Die Idee, dass TOR das Altern verlangsamt, kam Mitte der 1990er Jahre auf. Wie Forscher damals entdeckten, stellen ausgehungerte Zellen das Wachstum ein, weil die TOR-Aktivität zurückgeht. Für Gerontologen war das nichts Neues: Schon 1935 hatte der Ernährungswissenschaftler Clive McCay von der Cornell University in Ithaca (New York) festgestellt, dass junge Ratten, die auf extreme Hungerdiät gesetzt werden, nur sehr langsam wachsen und erstaunlich langlebig sind. Eingeschränkte Kalorienzufuhr hat sich seitdem bei verschiedenen Spezies vom Hefepilz über Spinnen bis hin zu Hunden als Rezept zur Verlängerung der maximalen Lebensspanne erwiesen. Nach vorläufigen Ergebnissen gilt das auch bei Affen. Eine Reduktion um etwa ein Drittel in der Jugend erhöht die maximale Lebensspanne allgemein um 30 bis 40 Prozent – wahrscheinlich durch Hinauszögern des altersbedingten Verfalls. Ältere Rhesusaffen aus Langzeitstudien zur Kalorienrestriktion sind jedenfalls außergewöhnlich gesund und sehen noch sehr jugendlich aus.

Der Trick funktioniert zwar nicht immer; bei einigen Labormausstämmen verkürzt sich die Lebensspanne sogar. Aber inzwischen mehren sich Hinweise, wonach Fasten auch beim Menschen ein gesundes Altern fördern kann. Substanzen, die den Effekt der Kalorienrestriktion nachahmen, ohne Hunger zu erzeugen, sind damit zum Heiligen Gral der Gerontologen geworden.

Kurz nach der Jahrtausendwende wussten die Forscher genug über TOR, um zu vermuten, dass seine Blockade eine verringerte Nahrungsaufnahme vortäuschen könnte. 2003 leitete Tibor Vellai, ein ungarischer Gastwissenschaftler an der Université de Fribourg (Schweiz), eine Untersuchung an Rundwürmern, die erste experimentelle Belege dafür lieferte. Indem er und seine Kollegen die TOR-Synthese genetisch unterdrückten, konnten sie die durchschnittliche Lebensspanne der Tiere mehr als verdoppeln!

Dasselbe ergab eine Studie am California Institute of Technology in Pasadena unter Leitung von Pankaj Kapahi nur ein Jahr später bei Taufliegen. Die Hemmung von TOR ließ die Tiere im Mittel länger leben und bewahrte sie zugleich vor den negativen Folgen übermäßiger Nahrungsaufnahme. 2005 schließlich lieferten Brian Kennedy, damals an der University of Washington in Seattle, und seine Kollegen den endgültigen Beweis für die Verbindung zwischen TOR und dem Altern. Sie schalteten verschiedene TOR-Signalwege in Hefezellen aus. In allen Fällen lebten die Tiere dadurch länger.

Die Entdeckung von Alterungsgenen

Diese und weitere Studien bestätigten somit die Vermutung, dass die Hemmung von TOR den Effekt einer Kalorienrestriktion nachahmt. Zugleich aber stellten sie eine Verbindung zur Wirkung bestimmter Genmutationen her, um deren lebensverlängernde Wirkung man schon seit einiger Zeit wusste. Das erste solche »Gerontogen« war etwa ein Jahrzehnt zuvor in Rundwürmern entdeckt worden. Ihre Mutation verdoppelte die durchschnittliche und die maximale Lebensspanne dieser Tiere; späteren Erkenntnissen zufolge wurde dabei der Insulinsignalweg unterbrochen. Bis dahin war der Alterungsprozess undurchschaubar komplex erschienen. Nun zeigte sich, dass er sich durch die Abwandlung nur eines Gens dramatisch verlangsamen lässt. Das war eine Sensation für die Gerontologie; denn damit bestanden plötzlich reelle Chancen, das menschliche Altern durch Medikamente hinauszuzögern.

Die Aussichten verbesserten sich in den späten 1990er und frühen 2000er Jahren, als Forscher auch bei Nagetieren diverse Gerontogene entdeckten, die Wachstumssignale blockieren – darunter solche, die durch Insulin und ein nahe

verwandtes Hormon namens insulinähnlicher Wachstumsfaktor (IGF, von insulinlike growth factor) vermittelt werden. 2003 stellte eine Maus mit einer solchen Mutation den Rekord für Langlebigkeit in ihrer Art auf: fast fünf Jahre. Ihre Artgenossen erreichen im Labor normalerweise höchstens zweieinhalb Jahre.

Man sollte meinen, diese neu entdeckten Verbindungen zwischen TOR, Kalorienrestriktion und Gerontogenen hätten einen erbitterten Wettlauf darum entfacht, die lebensverlängernde Wirkung von Rapamycin an Säugetieren nachzuweisen. Doch Forscher, die sich mit dem menschlichen Altern befassten, »nahmen TOR nicht wirklich ernst«, sagt Steven Austad, Gerontologe am Barshop Institute for Longevity and Aging Studies an der University of Texas in San Antonio – jedenfalls nicht vor Ende der 2000er Jahre. Der Grund: Rapamycin war als Immunsuppressor bekannt; es schien deshalb nicht als Anti-Aging-Mittel geeignet, weil seine Einnahme über längere Zeit schädlich wäre. Zelton Dave Sharp, einer von Austads Institutskollegen, ließ sich davon jedoch nicht abschrecken. Nach intensivem Studium der TOR-Literatur organisierte er 2004 einen Großversuch mit mehr als 2000 Mäusen, die dauerhaft Rapamycin erhielten.

Dabei schien die vom National Institute on Aging finanzierte Studie schon im Vorfeld zu scheitern: Es gab Probleme, die richtige Dosierung des Wirkstoffs im Mausfutter herauszufinden. Dadurch verzögerte sich der Beginn des Experiments, bis die Mäuse 20 Monate alt waren – das menschliche Äquivalent von 60 Jahren. An diesem Punkt, erklärt Austad, »glaubte niemand – und ich meine wirklich niemand – mehr daran, dass es funktionieren würde«. Schließlich verlängert bei so alten Tieren nicht einmal Hungern mehr die Lebensdauer. Doch es kam anders, und die drei Gerontologie-Teams, die unter der Leitung von Randy Strong am Barshop Institut, David E. Harrison am Jackson Laboratory in Bar Harbor (Maine) und Richard A. Miller an der University of Michigan in Ann Harbor die Untersuchung durchführten, schrieben Geschichte: 2009 berichteten sie, dass Rapamycin die restliche Lebensdauer bei den alten männlichen Nagern im Ver-

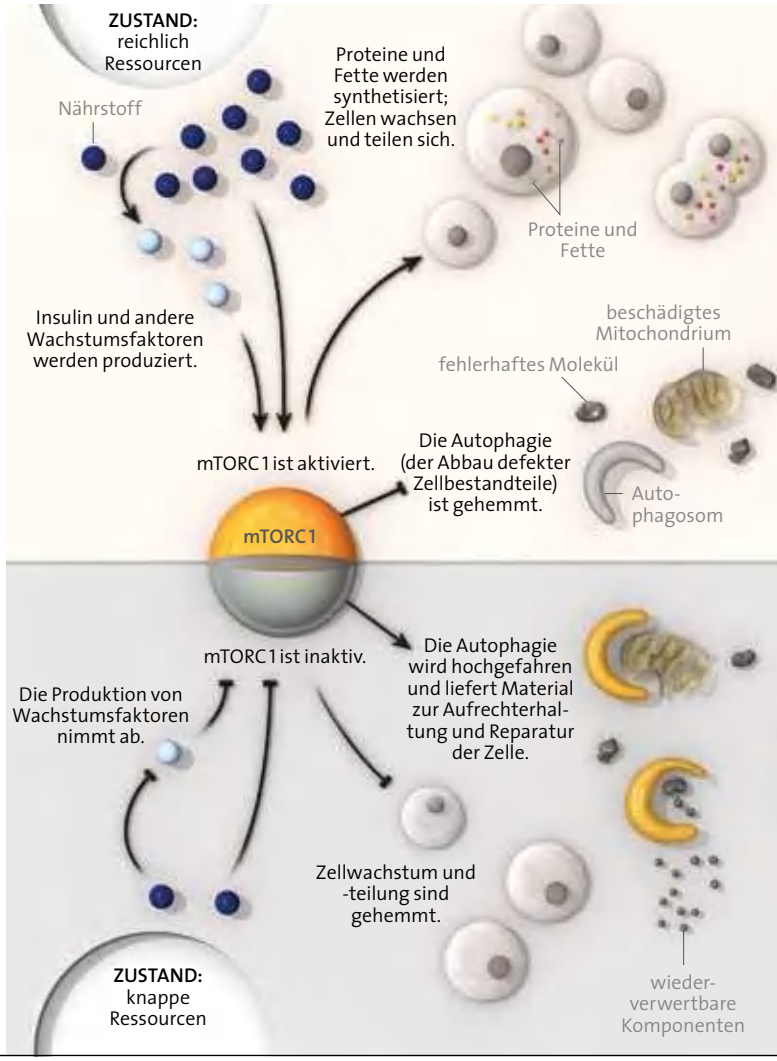
Die TOR-Story: Ein Molekül mit zwei Gesichtern

Rapamycin verlängert das Leben von Hefepilzen und Tieren, indem es ein Enzym namens TOR hemmt. Auch eine drastisch verringerte Kalorienzufuhr kann das Altern verlangsamen – unter anderem durch ihren Einfluss auf TOR. Forschungen über dessen Wirkungsweise in Zellen und über die Frage, wie seine Hemmung das Altern verlangsamt, zeichnen ein zwiespältiges Bild dieses Moleküls. Einerseits ist es als Nährstoffsensor für Wachstum und Entwicklung früh im Leben unerlässlich. Andererseits kann es im ausgewachsenen Organismus Zellfunktionen beeinträchtigen und so das Gewebe schädigen. Forscher vermuten darin eine der Ursachen für das Altern und die damit verbundenen Krankheiten. Rechts sind die Wirkmechanismen von mTOR, der Säugetierversion, stark vereinfacht dargestellt. Das Enzym ist in ein komplexes Netzwerk von Molekülen eingebunden, die sich gegenseitig beeinflussen. Pfeile bedeuten eine Stimulation, Linien mit stumpfem Ende eine Hemmung.

Zentraler Nährstoffsensor früh im Leben

Das Säugetier-TOR übt seine Funktion als Bestandteil eines Komplexes namens mTORC1 aus. Dieser wird bei reichlicher Nahrungszufuhr aktiv (oben), durch die sich die Konzentration von Insulin und damit verwandten Wachstumsfaktoren im Blut erhöht. In diesem Fall regt er die Synthese von Proteinen, Fetten und weiteren Zellbestandteilen an. Außerdem beschleunigt er Wachstum und Teilung der Zelle. Gleichzeitig gibt mTORC1 die Anweisung, die Autophagie zurückzufahren. Dabei handelt es sich um einen Mechanismus zum Abbau von fehlerhaften Molekülen und beschädigten Mitochondrien, den Kraftwerken der Zelle.

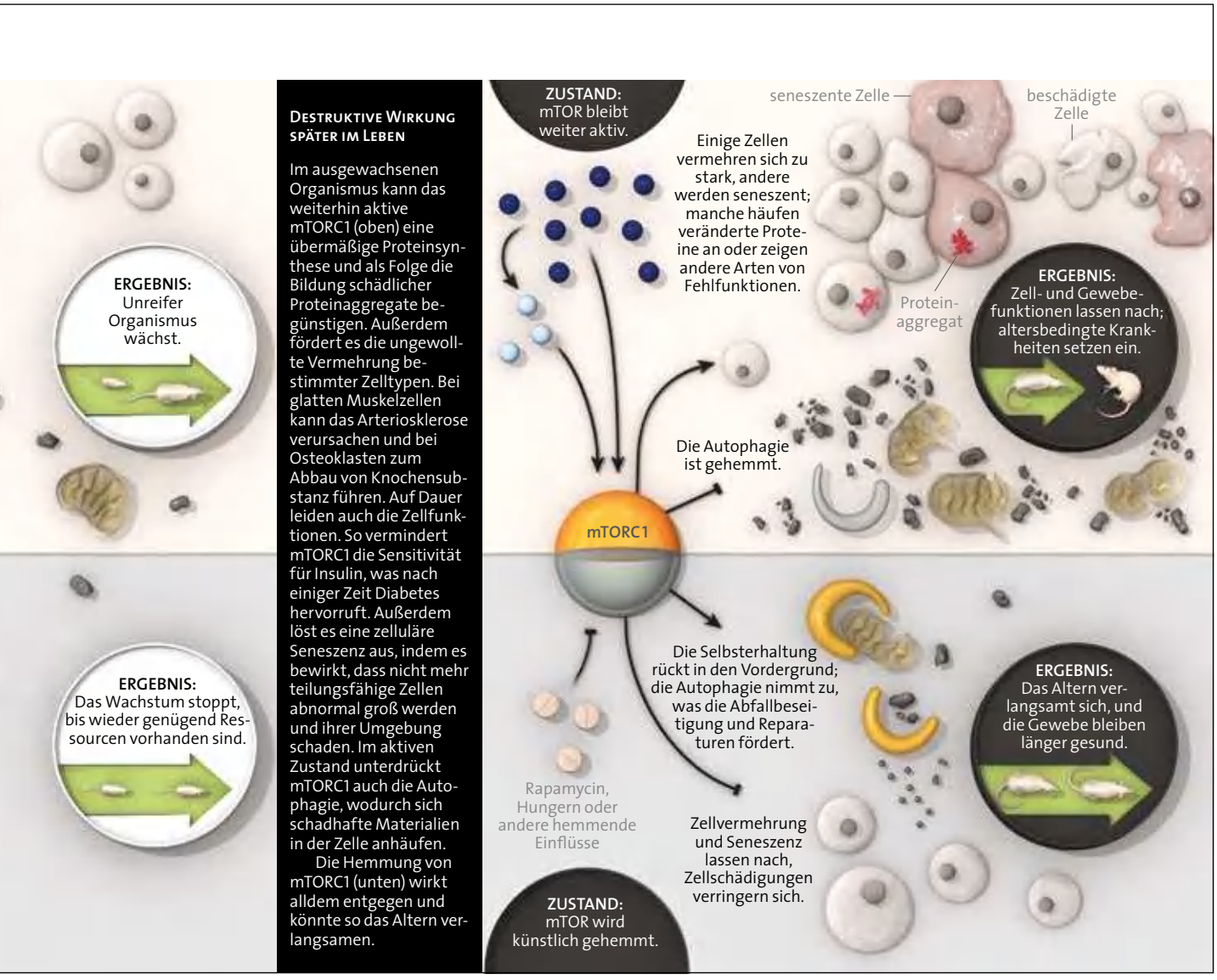
Wenn Nahrung oder andere Ressourcen knapp sind (unten), geht mTORC1 in den inaktiven Zustand über. Das veranlasst die Zellen, das Wachstum weit gehend einzustellen und mehr für die Selbsterhaltung zu tun. Sie verstärken die Autophagie, um sich einen Notvorrat an Grundbaustoffen für Zellreparaturen und die Energieerzeugung zu beschaffen.



gleich zu unbehandelten Kontrolltieren um erstaunliche 28 und bei den weiblichen sogar um 38 Prozent erhöht hatte. Das entsprach einer Verlängerung der maximalen Lebensspanne um 9 beziehungsweise 14 Prozent.

Nach diesen Aufsehen erregenden Ergebnissen an Mäusen bestätigten weitere Studien schon bald die Bedeutung von TOR für das Altern. So schalteten Wissenschaftler am University College in London ein Gen namens *S6K1* aus, auf dem ein Enzym verschlüsselt ist, das mTORs Kontrolle über die Proteinsynthese vermittelt. Dieser Eingriff machte weibliche Mäuse resistent gegen altersbedingte Krankheiten und erhöhte ihre maximale Lebensspanne; seltsamerweise profitierten männliche Tieren allerdings kaum davon. Die drei US-Labors, die Rapamycin an Mäusen getestet hatten, wiederholten ihren Versuch mit neun Monaten alten Tieren und fanden heraus, dass deren Lebensspanne etwa um den gleichen Betrag zunahm wie bei den Nagern, die den Wirkstoff erst mit 20 Monaten erhalten hatten. Demnach scheint Rapamycin vor allem nach der Lebensmitte Vorteile zu bringen – möglicherweise, weil ab diesem Zeitpunkt die Abbauerscheinungen, denen es entgegenwirkt, vermehrt auftreten.

Die Tatsache, dass die Hemmung von TOR im gesamten Tierreich lebensverlängernd wirkt, ragt wie ein Leuchtturm aus dem Meer der molekularen Details des Alterns. Andere Signalwege sind für die Langlebigkeit aber ebenfalls wichtig, und auch die Kalorienrestriktion bleibt weiter von Bedeutung. Sie erweist sich zunehmend als einer von mehreren Bestandteilen eines komplexen, stark verzweigten Netzwerks mit vielerlei Stellschrauben, die sich justieren lassen, um ein gesundes Altern zu fördern. Andere Bestandteile sind mit Insulin verwandte Enzyme sowie so genannte Fox-Proteine (von englisch forkhead box) der Klasse O, welche die Stressantwort in Zellen aktivieren. Es gibt auch deutliche Hinweise darauf, dass Sirtuine eine wichtige Rolle spielen. Offenbar sind sie daran beteiligt, die positiven Effekte des Hungerns bei Säugetieren zu vermitteln. Unter bestimmten Umständen wirken sie auch an der TOR-Suppression mit. Nach derzeitigem Kenntnisstand erscheint TOR jedoch als oberste



EMILY COOPER

Instanz. Es fungiert als eine Art zentrale Schaltstelle dieses Netzwerks, bei dem die unterschiedlichen Inputs zusammenlaufen. Es verarbeitet sie und kontrolliert so die Alterungsgeschwindigkeit. Zumindest gilt das bei vielen Tierarten und vermutlich auch beim Menschen.

Beim Versuch, die Mechanismen besser zu verstehen, die das Altern verlangsamen, stellt sich unweigerlich die Frage, warum solche Mechanismen überhaupt existieren sollten. Evolutionsbiologen wissen darauf keine rechte Antwort. Der Sinn der natürlichen Auslese ist es, erfolgreiche Fortpflanzung zu ermöglichen, und nicht, einzelne Organismen im Spiel des Lebens in die Verlängerung zu schicken, so dass sie in einem Alter noch fit sind, in dem andere normalerweise schon Räubern, Infektionen, Unfällen oder ähnlichen Fährnissen zum Opfer gefallen sind. Dank dem Wirken der Evolution verfügen alle Lebewesen über das Rüstzeug, lange genug für eine erfolgreiche Vermehrung zu leben, um dann wie verlassene Gebäude allmählich zu verfallen. Wenn aber Fasten den altersbedingten Abbau bei vielen sehr unterschiedlichen Tierarten hinauszögert, kann das nur einen Grund haben: Es muss einen sehr alten, stark konservierten Mechanismus geben, der sich durch natürliche Auslese entwickelt hat, um das Altern bei Nahrungsknappheit zu verlangsamen. Wie ist das möglich?

Das pervertierte Wachstum des Alters

Eine häufig vorgeschlagene Lösung dieses Rätsels lautet: Die Evolution hat dafür gesorgt, dass Organismen in Hungerperioden langsamer altern, damit ihnen, wenn wieder günstigere Bedingungen herrschen, noch ausreichend Zeit für eine erfolgreiche Fortpflanzung bleibt. Skeptiker wie Austad vom Barshop Institute überzeugt das nicht. Sie bezweifeln, dass Wildtiere genauso wie ihre verhätschelten Artgenossen im Labor bei knapper Kost ein höheres Alter erreichen. Abgemagert und vom Hunger geschwächt, haben sie in freier Natur vermutlich kaum eine Chance, lange genug zu überleben, um von Genen zu profitieren, die ihr Altern verlangsamen – geschweige denn sie weiterzugeben.

Einige Gerontologen halten eine andere Möglichkeit für plausibler. Ihrer Ansicht nach verlängert die Kalorienrestriktion die Lebensspanne nur als Nebeneffekt von Mechanismen, die aus altersunabhängigen Gründen evolutionär entstanden sind. Austad etwa meint, dass Wildtiere in kargen Zeiten auch ungewohnte Nahrung fressen. Dabei nehmen sie möglicherweise Giftstoffe auf, die in ihrem normalen Futter nicht vorkommen. Das könnte eine Tendenz gefördert haben, in Hungerzeiten Vorkehrungen gegen Toxine zu treffen – durch Aktivierung der zellulären Programme zur Stressbewältigung und der zugehörigen Reparaturprozesse. Diese Maßnahmen wirken aber auch dem Altern entgegen.

Oder ist die magische Wirkung der Kalorienrestriktion vielleicht nur eine Art Betriebsunfall? Diese ziemlich ausgefallene Hypothese leitete vor einigen Jahren Mikhail V. Blagosklonny, Krebsforscher am Roswell Park Cancer Institute in Buffalo (New York), aus den Erkenntnissen über TOR ab. Der gebürtige Russe hat ein breit gefächertes Interessenspek-

trum, das von der Krebsforschung bis zur Zellbiologie reicht. Seiner Ansicht nach bringt uns ausgerechnet die Fähigkeit zum Wachstum, die das Wesen der Jugend ausmacht, am Ende ins Grab. Folglich verlängert Hungern das Leben, weil es die im fortgeschrittenen Alter eher schädlichen Wachstumssignale behindert. Und das wichtigste darunter ist TOR.

Warum das in der Jugend für Entwicklung und Fortpflanzung essenzielle Enzym später zum Sargnagel wird, hat laut Blagosklonny vielerlei Gründe. Zum Beispiel begünstigt es wegen seiner wachstumsfördernden Signale

- die Vermehrung glatter Muskelzellen in Arterien, was zur Arteriosklerose führt,
- die Bildung von Fettpolstern, die Entzündungsreaktionen Vorschub leisten,
- die Entwicklung einer Insulinresistenz, die Diabetes hervorruft,
- die Proliferation so genannter Osteoklasten, wodurch Knochensubstanz abgebaut wird
- und unkontrolliertes Zellwachstum mit Krebs als Folge.

Außerdem leistet TOR, indem es die Autophagie unterdrückt, der Ansammlung von Proteinaggregaten und nicht mehr funktionsfähigen Mitochondrien Vorschub, die erbgutschädigende freie Radikale freisetzen und den Energiestoffwechsel der Zelle stören. Schließlich trägt es auch dazu bei, dass sich abbauresistente Proteine in Nervenzellen anhäufen – ein Vorgang, der bei der Alzheimererkrankung und anderen Formen von Neurodegeneration eine Rolle spielt. Wie Blagosklonny nachweisen konnte, fördert TOR im hohen Alter zudem die Zellseneszenz, indem es nicht mehr teilungsfähige Zellen stimuliert, so dass sie anschwellen und durch übermäßige Aktivität ihre noch intakten Nachbarn schädigen. Das beeinträchtigt die Regenerationsfähigkeit des Gewebes.

All dies zeigt nach Ansicht des Forschers, dass die Evolution gar keinen Mechanismus entwickelt hat, um das Altern zu verlangsamen. Rapamycin, ungenügende Nahrungsaufnahme und Genmutationen, die wachstumsfördernde Hormone blockieren, sind im Grunde nichts als unwillkommene äußere Störungen. Lebensverlängernd wirken sie nur, weil

sie zufällig dem in die Quere kommen, was Blagoskonny das »pervertierte Wachstum« des Alterns nennt. Tatsächlich funktioniert der TOR-Signalweg geradezu als Alterungsprogramm, obwohl er entstanden ist, um die frühe Entwicklung eines Organismus zu unterstützen.

Blagosklonnys Theorie fußt im Kern auf einer weithin anerkannten Hypothese, die George C. Williams (1926–2010) schon 1957 aufgestellt hat. Der berühmte Evolutionsbiologe spekulierte damals, dass zweischneidige Gene für das Altern verantwortlich seien: Früh im Leben von Vorteil, wirkten sie später schädlich. Diese »antagonistischen pleotropen Gene« würden von der Evolution begünstigt, weil die natürliche Auslese laut Williams »im Zweifel stets der Jugend Vorrang vor dem Alter gibt«. Blagosklonny betrachtet TOR als perfektes Beispiel für ein solches Gen.

Wie viele neue Theorien ist auch seine jedoch umstritten. Manche Wissenschaftler meinen, sie messe TOR zu viel Bedeutung bei, und einige wenden ein, dass nicht TORs Einfluss auf das Wachstum die Hauptrolle beim Altern spiele; entscheidend seien vielmehr andere Aspekte – zum Beispiel die Hemmung der Autophagie, welche die Zellbestandteile erneuert. Dennoch gibt es auch zustimmende Reaktionen. Hall aus Basel hält es für das Verdienst Blagosklonnys, »Punkte verbunden zu haben, die andere nicht einmal sehen« – und fügt hinzu: »Ich bin geneigt, ihm Recht zu geben.«

Ein »TOR« in die Zukunft der Medizin

Wenn TOR eine Haupttriebfeder des Alterns ist, was gibt es dann für Möglichkeiten, es auszuschalten? Rapamycin hat erhebliche Nebenwirkungen. So kann es den Cholesterinspiegel erhöhen, Blutarmut verursachen und die Wundheilung stören. Deshalb scheidet es als Kandidat für ein Anti-Aging-Medikament beim Menschen wohl aus. Ein anderes Mittel, Metformin, wäre eventuell eine Alternative. Allerdings müsste es für diese Anwendung erst noch getestet werden. Immerhin scheint es ungefährlich: Es ist das am häufigsten verschriebene Medikament zur Behandlung von Diabetes – Millionen von Menschen nehmen es schon seit Langem zur Senkung des Blutzuckerspiegels, ohne dass bisher ernstliche Nebenwirkungen aufgetreten sind. Seine Wirkungsweise wirft noch Fragen auf, aber man weiß, dass es den TOR-Signalweg hemmt. Außerdem aktiviert es ein weiteres mit dem Altern zusammenhängendes Enzym namens AMPK, das die Stressantwort in Zellen einleitet und gleichfalls durch Fasten stimuliert wird. Metformin hatte in Versuchen mit Mäusen die gleiche Wirkung auf die Genaktivität wie Hungern, und es gibt Anhaltspunkte dafür, dass es die maximale Lebensspanne der Nager verlängert. Das wird derzeit in strengen wissenschaftlichen Tests überprüft. Ob das Mittel auch beim Menschen eine Kalorienrestriktion nachahmt, dürfte allerdings frühestens in einigen Jahren klar sein.

Hochgerechnet von den Ergebnissen der Studien an Mäusen, könnte Rapamycin Menschen im Durchschnitt fünf bis zehn Jahre länger leben lassen. Das wäre beachtlich. Die Lebenserwartung ist in den Industrieländern seit dem Aufkommen der modernen Medizin so stark angestiegen, dass es uns inzwischen wie Spitzensportlern ergeht, welche die bestehenden Rekorde nur noch minimal verbessern können: Die durchschnittliche Lebensspanne hat sich während des 20. Jahrhunderts in den USA um mehr als 50 Prozent erhöht; im letzten Jahrzehnt betrug die Zunahme dagegen nicht einmal mehr zwei Prozent. Weil die Kindersterblichkeit mittlerweile fast den niedrigsten überhaupt möglichen Wert erreicht hat, lässt sich die Lebenserwartung nur noch durch Zurückdrängen altersbedingter Krankheiten steigern. Die explodierenden Kosten der geriatrischen Medizin zeugen von den erheblichen Anstrengungen auf diesem Gebiet.

Arzneimittel, die das Altern verlangsamen, wären da ein wahrer Segen. Genauso wie heute schon Medikamente zur Senkung von Blutdruck und Cholesterinspiegel einem Herzinfarkt in mittleren Jahren vorbeugen, wäre damit eine Prophylaxe von altersbedingten Krankheiten möglich – sei es Demenz, Osteoporose, grauer Star, Krebs, Verlust von Muskelmasse und -kraft, Taubheit, ja sogar Falten. Weil uns solche Substanzen länger fit und vital hielten, würden sie uns eine qualitativ hochwertige Zeit schenken und nicht nur einfach ein paar Jahre anhängen.

Ihre Entwicklung dürfte allerdings nicht einfach sein. Ein Haupthindernis ist, dass es keine verlässliche Messmethode für das Alterungstempo gibt. Deshalb lässt sich die Wirksamkeit und Verträglichkeit eines Medikaments beim Menschen bisher nur in schier endlos langen Versuchsreihen prüfen. Doch die Entdeckung von sicheren Anti-Aging-Mitteln wäre den Aufwand wert, selbst wenn nur ein gesundes Altern herauskäme und kein längeres Leben. Dann hätte das Probenröhrchen voller Dreck, eingesammelt vor fünf Jahrzehnten, ein echtes Wunder bewirkt.

DER AUTOR

David Stipp ist Wissenschaftsjournalist in Boston und seit den späten 1990er Jahren auf Gerontologie spezialisiert. 2010 erschien sein Buch »The Youth Pill: Scientists at the Brink of an Anti-Aging Revolution«. Er bloggt über Erkenntnisse der Alternsforschung unter **www.davidstipp.com**.

QUELLEN

Blagosklonny, M. V., Hall, M. N.: Growth and Aging: A Common Molecular Mechanism. In: Aging 1, S. 357–362, 2009

Harrison, D. E. et al.: Rapamycin Fed Late in Life Extends Lifespan in Genetically Heterogeneous Mice. In: Nature 460, S. 392–395, 2009

Sharp, Z. D.: Aging and TOR: Interwoven in the Fabric of Life. In: Cellular and Molecular Life Sciences 68, S. 587–597, 2011

Wullschleger, S. et al.: TOR Signaling in Growth and Metabolism. In: Cell 124, S. 471–484, 2006

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1152343**

Krebs, Blutgerinnung und Stress – eine ungewöhnliche Ménage-à-trois

Ein erhöhtes Krebsrisiko geht oft Hand in Hand mit einer verstärkten Neigung zu Blutgerinnseln. Die beiden verbindet ein bislang unbekannter Regulationsmechanismus bei der Bildung des Gerinnungsfaktors Prothrombin.

Von Matthias W. Hentze und Andreas E. Kulozik

Am Silvestertag 1866 entdeckte Armand Trousseau (1801–1867) in seinem linken Arm ein Blutgerinnsel. Der Pariser Internist hatte sich durch seine bahnbrechenden wissenschaftlichen Beiträge in ganz Frankreich einen ausgezeichneten Ruf erworben. Unter anderem hatte er einen Zusammenhang beobachtet zwischen dem häufigen Auftreten von Blutgerinnseln und Tumoren, insbesondere des Magens und der Bauchspeicheldrüse. Die Krankheitskombination wurde nach ihm auch als Trousseau-Zeichen benannt. Auf Grund dieser Erfahrungen interpretierte Trousseau sein eigenes Blutgerinnsel als Hinweis auf eine Krebserkrankung, von der er bis dahin noch nichts wusste. Tatsächlich erlag er ihr schon im Sommer des folgenden Jahres.

Es dauerte eineinhalb Jahrhunderte, bis nun endlich neue Forschungsergebnisse Licht ins Dunkel dieses mysteriösen Zusammenhangs zwischen Tumoren und der Neigung zur Bildung von Blutgerinnseln (Thrombose) bringen. Untersuchungen zu den Ursachen dieser so genannten Thrombophilie haben einen bislang unbekannten Mechanismus aufgedeckt, über den unser Körper die Produktion einzelner Proteine reguliert. Ihn nutzen auch Tumoren, um sich besser im Körper auszubreiten. Die zum Teil überraschenden Erkenntnisse erlauben nun sowohl neue Einblicke in die Prozesse, die bei Entzündungen ablaufen, als auch in die Entwicklung innovativer Behandlungsstrategien gegen Tumorerkrankungen.

Zentraler Akteur des Dramas ist ein Protein namens Prothrombin. Dessen Umwandlung in Thrombin, etwa bei Verletzungen, stellt einen wichtigen Schritt bei der Blutgerinnung dar. Zu große Mengen von Prothrombin, das auch F2 (Gerinnungsfaktor II) genannt wird, stören die fein regulierte Balance zwischen blutgerinnungsfördernden und -hemmenden Molekülen, was letztlich zu Thrombophilie führt.

Wie alle Eiweiße besteht auch Prothrombin aus einer Kette von Aminosäuren. Diese sind gemäß einem vorgegebenen Bauplan miteinander verknüpft – der Boten-RNA (mRNA für messenger RNA). Die mRNA besteht im Wesentlichen aus Abfolgen der basischen Moleküle Adenin (A), Cytosin (C), Guanin (G) und Uridin (U) und beginnt ihr Dasein als direkte Kopie der in der DNA kodierten genetischen Information (siehe Grafik S. 33). Bevor sie jedoch als Blaupause für die Eiweißsynthese dienen kann, muss sie mehrere Reifungsschritte (»Prozessierung«) durchlaufen:

- Im mittleren Teil der Vorläufer-mRNA gehen oft zahlreiche Abschnitte verloren, so genannte Introns;
- das vordere Ende wird chemisch verändert, um die Stabilität zu erhöhen;
- Enzyme schneiden das hintere Ende an einem exakt festgelegten Punkt ab und hängen dort eine Abfolge von rund 250 Adeninen an: den »Poly-A-Schwanz«.

Dieser letzte Schritt ähnelt der Bearbeitung eines abgeschnittenen Seils, das sonst ausfransen würde. Der Poly-A-Schwanz spielt für die Funktionsfähigkeit der mRNA und auch für ihre Stabilität eine entscheidende Rolle. Letzteres ist

AUF EINEN BLICK

ÜBERRASCHENDE ZUSAMMENHÄNGE

1 **Krebspatienten** leiden häufig an einer Neigung zu **Blutgerinnseln**. Umgekehrt haben Menschen mit einer verstärkten Blutgerinnung ein erhöhtes Krebsrisiko.

2 Geraten Zellen durch **Entzündungsprozesse** unter **Stress** – etwa bei Krebs –, blockiert ein Enzym namens p38-MAP-Kinase jene Proteine, die normalerweise die Produktion von **Prothrombin** drosseln. Dadurch entsteht dieser Blutgerinnungsfaktor im Übermaß.

3 Thrombin, die aktive Version von Prothrombin, trägt auch zur Bildung neuer Blutgefäße bei und kann den Kitt auflösen, der die Zellen zusammenhält. Möglicherweise erhöhen also Krebszellen ihre Prothrombinproduktion, um besser **in gesundes Gewebe einzudringen** und **neue Blutgefäße herzustellen**, welche die Tumorzellen versorgen.

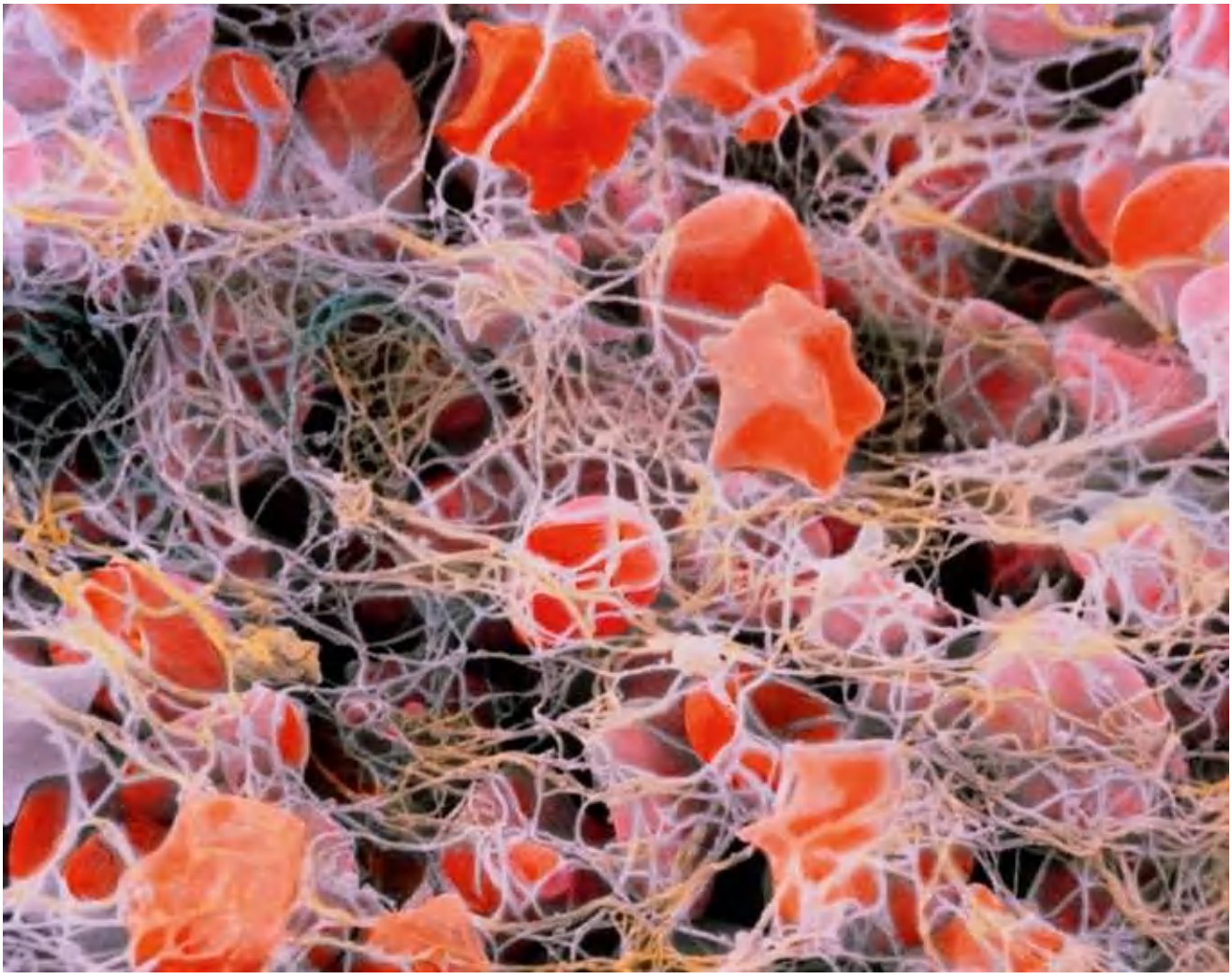
4 Dabei bestimmt ein zuvor unbekannter Mechanismus, wie viel Prothrombin entsteht. Er beeinflusst die Umwandlung der Vorläufer-mRNA in die **reife mRNA** – den Bauplan für das Protein – und letztlich die **Menge** des gebildeten Prothrombins.

wichtig, denn: Häufen sich größere Mengen einer mRNA an, entsteht im Allgemeinen mehr entsprechendes Eiweiß – so auch bei der Prothrombin-mRNA.

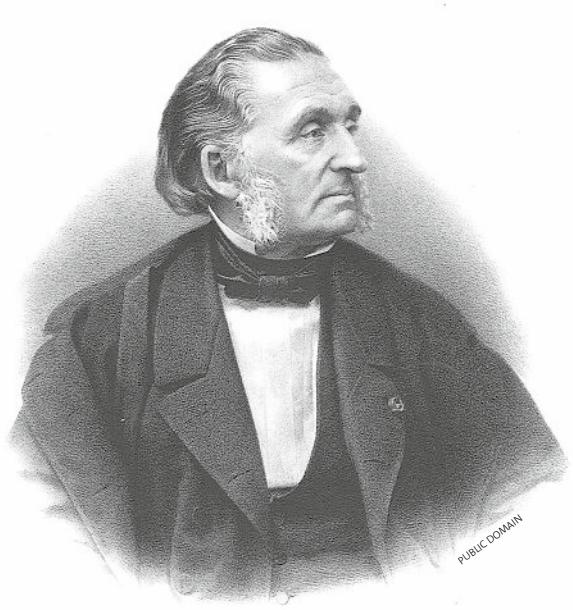
Forscher um den niederländischen Biochemiker Rogier M. Bertina von der Universität Leiden hatten schon 1996 eine ungewöhnliche ererbte Mutation in der Prothrombin-mRNA entdeckt, die bei vielen Thrombophiliepatienten auftritt. Und zwar findet sich diese genau an jener Stelle des hinteren RNA-Teils, wo er vor Anfügen des Poly-A-Schwanzes abgeschnitten wird. Die Entdeckung überraschte die Wissenschaftler, denn meistens wirken sich Veränderungen der RNA nur dann auf ihre Funktion aus, wenn sie die Aminosäureabfolge des Eiweißes betreffen. Die Schnittstelle liegt jedoch hinter der Region, die den Bauplan dafür enthält. Zudem geht die bei etwa ein bis zwei Prozent der nord- und westeuropäischen Bevölkerung vorkommende und damit vergleichsweise häufige Mutation nicht wie üblich mit einer eingeschränkten Funktion einher, sondern mit einer gesteigerten: Es entsteht dadurch mehr Protein.

Wegen dieser ungewöhnlichen Situation betrachteten die Forscher die Veränderung zunächst gar nicht als wirklichen Auslöser der erhöhten Eiweißsynthese, sondern nur als einen genetischen Marker für eine bis dato noch unbekannte Ursache. Außerdem war man zu dieser Zeit allgemein der Auffassung, der Reifungsprozess am hinteren Ende der mRNA sei ein zwar notwendiger, aber kaum regulierter Schritt auf dem Weg vom Gen zum Protein. Zumindest waren damals noch keine Zusammenhänge zwischen Veränderungen an der Schnittstelle in der RNA und irgendwelchen Krankheiten durch gesteigerte mRNA-Produktion bekannt.

Die Blutgerinnung ist ein komplizierter mehrstufiger Ablauf, an dessen Ende sich ein Netzwerk aus Fibrinfasern bildet, in dem sich die roten Blutkörperchen verfangen. Ein wichtiger Schritt bei dieser biochemischen Reaktionskaskade ist die Umwandlung von Prothrombin in Thrombin. Normalerweise hat die Blutgerinnung die Aufgabe, den Körper etwa bei Verletzungen vor übermäßigem Blutverlust zu schützen. Eine zu große Menge an Prothrombin kann aber dazu führen, dass die Betroffenen vermehrt spontan Gerinnsel in den Blutgefäßen bilden.



AG. FOCUS / SPL / PIETRO MOTTA



Der französische Mediziner Armand Trousseau (1801–1867) entdeckte einen Zusammenhang zwischen dem häufigen Auftreten von Blutgerinnseln und bestimmten Tumoren (genannt Trousseau-Zeichen). Ironie des Schicksals: Trousseau starb an einer Krebserkrankung, die er bei sich selbst auf Grund eines Blutgerinnsels im Arm diagnostizierte.

Nachdem wir uns jedoch die Basenabfolge an dieser Stelle der Prothrombin-mRNA genauer angeschaut hatten, fiel uns auf: Bei Thrombophilie wird das normalerweise vorkommende CG durch ein CA ersetzt. Nun enthalten aber die mRNAs der meisten anderen Proteine dort genau dieses CA und kein CG. Insofern bildet die Prothrombin-mRNA eine Ausnahme unter den RNAs.

Daraus zogen wir zwei Schlussfolgerungen. Zum einen könnte der Reifungsprozess am hinteren Ende der Prothrombin-mRNA davon abhängen, ob hier ein CG oder ein CA steht. Und zum anderen könnte der Wechsel von CG zu CA bei Thrombophilie möglicherweise die Reifung fördern und damit zu mehr Prothrombin-mRNA führen, da CA ja eigentlich den Normalfall darstellt. Unsere folgenden Untersuchungen bestätigten diese Annahmen. Damit hatten wir ein grundsätzlich neues Prinzip etabliert, wie Genveränderungen Erkrankungen auslösen können: indem sie die Prozessierung der Vorläufer-mRNA fördern und dadurch die Menge an gereifter mRNA erhöhen.

W I S wissenschaft in die schulen!

Didaktische Materialien für den Unterricht zum Thema »Krebs« kostenfrei herunterladen unter:

www.**wissenschaft-schulen.de**/krebs

Die Entdeckung warf jedoch sofort wieder neue Fragen auf: Weshalb hat das Prothrombin-Gen bei Gesunden ein ineffizientes Reifungssignal? Und wie schaffen es die Zellen, trotzdem ausreichende Mengen des Proteins zu produzieren? Eine genauere Untersuchung des RNA-Strangs zeigte zunächst, dass an der hinteren Schnittstelle sogar noch ein weiteres Element fehlt, das normalerweise die Prozessierung des Moleküls fördert. Dieses DSE (Abkürzung für »downstream sequence element«) enthält sehr viel Uridin, was bei der Prothrombin-RNA nicht der Fall ist.

Dann entdeckten wir jedoch einen kurzen Abschnitt, den wir USE für »upstream sequence element« nannten und der die Effizienz von CG als Reifungssignal massiv erhöhen kann. Dieser »USE-Verstärker« funktioniert allerdings nicht nur im Zusammenspiel mit CG, sondern genauso bei einem CA-Signal, und führt dann zu einer überhöhten Prothrombin-mRNA-Produktion. Genau das passiert bei Thrombophiliepatienten.

Aber warum hat sich überhaupt dieses komplizierte System aus einem abgeschwächten Element, das von einer anderen Sequenz verstärkt werden muss, im Verlauf der Evolution herausgebildet? Es wäre doch viel einfacher, wenn wie bei anderen RNAs ein einziges, ausreichend effizientes Signal die Aufgabe übernähme. Ein möglicher Zweck bestünde darin, die mRNA-Produktion bei Bedarf erhöhen zu können, also regelbar zu machen. Um herauszufinden, wie der USE-Verstärker beim Reifungsprozess mitwirkt, mussten wir uns näher mit jenen Proteinen beschäftigen, die an der Prozessierung am Schwanzende von mRNAs beteiligt sind.

Diese Eiweiße finden sich dabei teilweise zu größeren Komplexen zusammen und können sich erst dann an die mRNA anheften, um ihre Aufgabe zu erfüllen. Wie wir herausfanden, wird der Vorgang erleichtert, wenn sich an den USE-Verstärker einige weitere Proteine binden (mit den Bezeichnungen U2AF35, U2AF65 und PTB).

Zellen unter Stress

Von diesen Molekülen war bereits bekannt, dass sie eine Rolle spielen, sobald Zellen unter Stress geraten. Daher riefen wir als Nächstes bei Laborkulturen diesen Zustand durch Zugabe der Substanz Anisomycin hervor. Ergebnis: Die Zellen bildeten vermehrt Prothrombin-mRNA. Wie lässt sich das erklären?

Normalerweise kleben andere Proteine – genannt FBP2 und FBP3 – am USE und blockieren so den Zugang der Verstärkerproteine U2AF35, U2AF65 und PTB. Bei zellulärem Stress lösen sich FBP2 und -3 jedoch ab, was den Verstärkern ermöglicht, sich an das USE anzuheften, worauf sich größere Mengen an stabiler mRNA bilden. Experimente, bei denen wir in kultivierten Zellen einerseits U2AF35, U2AF65 und PTB beziehungsweise andererseits FBP2 und FBP3 gezielt ausschalteten, untermauerten diese Vorstellung: Sie belegten, dass erstere drei Proteine für die Reifung der Prothrombin-mRNA benötigt werden, während die beiden letzteren diesen Prozess blockieren.

Schließlich entdeckten wir die entscheidende Rolle eines Enzyms namens p38-MAP-Kinase, von dem bereits bekannt war, dass es durch intrazellulären Stress aktiviert wird: Es hängt den USE-Blockierern FBP2 und -3 eine oder mehrere Phosphatgruppen an, die chemisch gesehen sauer reagieren. Das erklärt, warum sich die beiden Proteine dann nicht mehr an das USE der ebenfalls sauren mRNA binden – denn »sauer« und »sauer« stoßen sich ab.

Damit fügten sich die vielen Puzzleteile zu einem Gesamtbild zusammen, das sowohl den ungewöhnlichen Bauplan der Prothrombin-mRNA sowie deren Rolle bei der Thrombophilie erklärt als auch ein ganz neues Regulationsprinzip für die Umsetzung genetischer Information in Proteine entwirft (siehe Grafik S. 34):

➤ Die Reifung der Prothrombin-mRNA wird nicht wie üblich recht unflexibel über hocheffiziente Signale in der Sequenz (CA) und das »downstream sequence element« (DSE) gesteuert, sondern über die Kombination eines deutlich abgeschwächten Signals (CG) ohne DSE mit einem regelbaren Verstärker, dem USE.

➤ Der Verstärker kann dann seine Aufgabe erledigen, wenn sich die Faktoren U2AF35, U2AF65 und PTB an ihn binden. Heften sich jedoch ihre Gegenspieler FBP2 und -3 an ihn, wird er ausgeschaltet.

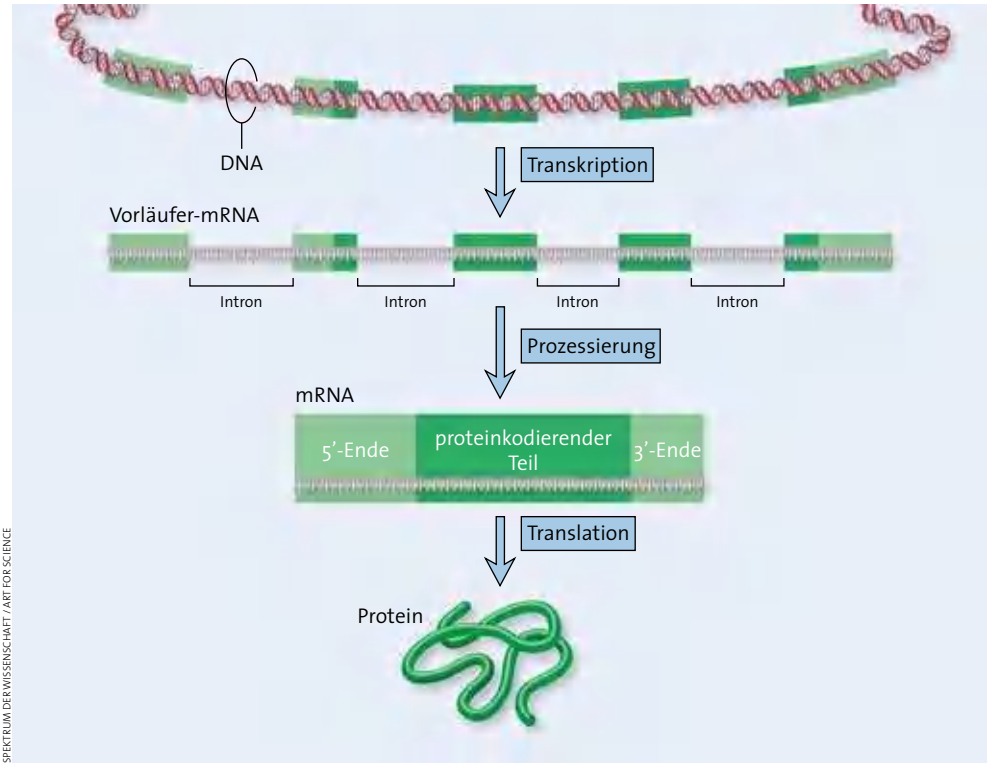
➤ In gestressten Zellen sorgt die p38-MAP-Kinase dafür, dass sich die beiden FBPs nicht mehr an das USE anlagern. Folge: mehr Prothrombin-mRNA und entsprechend mehr Prothrombin, was die Blutgerinnung erleichtert.

➤ Wirkt dieser Verstärkermechanismus auf Grund einer Mutation zusammen mit einem normal starken RNA-Reifungssignal (CA) statt mit einem abgeschwächten (CG), so entsteht ein Übermaß an Prothrombin. Die Betroffenen neigen dann zu Thrombosen.

Diese Erkenntnisse helfen aber nicht nur, die Thrombophilie besser zu verstehen, sondern wirken sich auch auf ganz andere Bereiche der Medizin aus. Jeder Klinikarzt weiß, dass das Thromboserisiko bei Patienten mit entzündlichen Erkrankungen oder bei Stresssituationen wie Operationen ansteigt. Und wie eingangs beschrieben, wurde Armand Trousseau durch seine Thrombose im Arm bewusst, dass er womöglich Krebs hatte – obwohl der Tumor selbst noch keine Symptome verursachte. Interessanterweise lassen sich bei solchen Erkrankungen meist größere Mengen an Prothrombin nachweisen, und die p38-MAP-Kinase ist in der näheren Umgebung von Entzündungen und Tumoren überdurchschnittlich aktiv. Diese Zusammenhänge erforschten wir anhand von Tiermodellen sowie an Gewebeproben von Patienten.

Zunächst nutzten wir die Tatsache, dass man bei Mäusen durch Einspritzen der bakteriellen Substanz LPS (Lipopolysaccharid) eine Entzündungsreaktion hervorrufen kann, die vor allem in der Leber die Prothrombinproduktion anregt. Wie wir feststellten, findet sich in solchen Mauslebern tatsächlich mehr reife Prothrombin-mRNA, und das Verstärkerprotein PTB neigt dort dazu, sich an das USE zu binden – dessen Gegenspieler FBP2 und FBP3 jedoch weniger.

Ergänzend untersuchten wir Gewebeproben von Krebspatienten, denen Metastasen aus der Leber entfernt worden waren. Es zeigte sich, dass diese Geschwulste im angrenzenden gesunden Lebergewebe die Prothrombinproduktion sti-



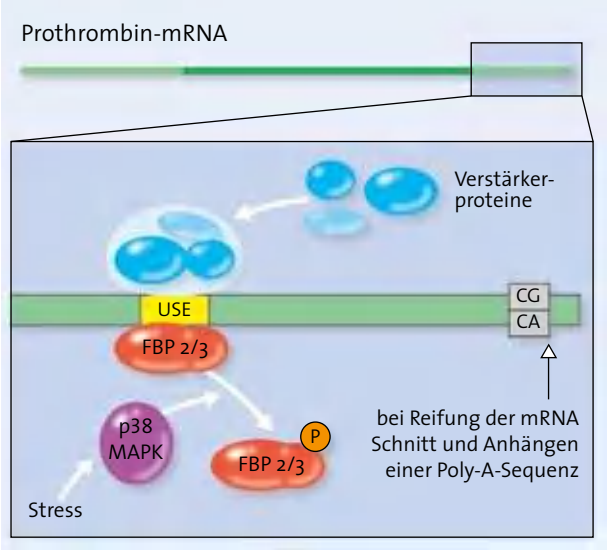
SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ART FOR SCIENCE

Die als DNA gespeicherte genetische Information für ein Protein wird zunächst in Vorläufer-mRNA übersetzt (Transkription), die dann in reife mRNA umgewandelt wird. Ein wesentlicher Teil dieser Prozessierung ist das Herausschneiden von Introns und das Zusammenfügen der so entstandenen Enden, aber auch Veränderungen am hinteren Ende der RNA, welche die Stabilität des Moleküls beeinflussen (siehe Grafik S. 34). Erst danach dient das Endprodukt als Bauanleitung für die Proteinsynthese (Translation).

Regulation der Prozessierung am hinteren Ende der Prothrombin-mRNA: Molekularer Schaltmechanismus

Die Vorläufer-mRNA wird hinter dem CG-Reifungssignal (bei Gesunden) beziehungsweise bei Thrombophiliepatienten hinter dem effizienteren CA-Signal abgeschnitten. Daraufhin wird dort ein Poly-A-Schwanz angehängt. Diesen Vorgang reguliert die Zelle über die Kombination des schwachen CG-Signals mit einem regelbaren Verstärker, dem USE (upstream sequence element). Der Verstärker wird dann tätig, wenn sich Verstärkerproteine wie U2AF35, U2AF65 und PTB an ihn binden. Dafür müssen aber erst ihre Gegenspieler FBP2 und -3 entfernt werden.

Dies geschieht etwa, wenn die Zelle unter Stress gerät. Dann heftet die p38-MAP-Kinase an die FBPs einen Phosphatrest an, worauf diese sich vom USE lösen. Das führt zu mehr Prothrombin-mRNA und entsprechend mehr Prothrombin, was die Blutgerinnung erleichtert. Liegt auf Grund einer Mutation ein starkes RNA-Reifungssignal (CA) vor statt eines abgeschwächten (CG), entsteht Prothrombin im Übermaß. Die Betroffenen neigen dann zu Thrombosen.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ART FOR SCIENCE

mulieren. Auch wenn hier streng genommen noch nicht bewiesen ist, dass der beschriebene Verstärkermechanismus via p38-MAP-Kinase und USE dafür verantwortlich ist, deutet gegenwärtig alles darauf hin.

Damit die Blutgerinnung ordnungsgemäß ablaufen kann, muss das aus Prothrombin entstehende Enzym Thrombin andere Proteine zerschneiden. Wegen dieser Funktion als Eiweißschere kann es auch den Kitt zwischen den einzelnen Zellen – die extrazelluläre Matrix – auflösen und damit dem Tumor helfen, sich in gesundes Gewebe hinein auszubreiten. Außerdem ist noch eine zweite Funktion des Gerinnungsfaktors bekannt: Er kann an speziellen Schaltermolekülen auf verschiedenen Zellen andocken und dadurch unter anderem das Gefäßwachstum ankurbeln. Bei Krebs verbessert das jedoch vor allem die Blutversorgung des Tumors. Auf diese Weise können Metastasen den beschriebenen Regulationsmechanismus zu ihren Zwecken missbrauchen – aber damit auch einen neuen strategischen Angriffspunkt gegen die Tumoren liefern. So ließen sich Medikamente, die eigentlich die Blutgerinnung hemmen sollen, möglicherweise gegen Krebs einsetzen.

Vermutlich gibt es eine Reihe weiterer mRNAs, die sich ebenfalls dieses bisher unbekannten Regulationsprinzips bedienen. Sind erst die entsprechenden Gene und Proteine identifiziert, dürften wir besser verstehen, wie Tumoren, Entzündungen und vielleicht auch noch andere Stresszustände in das Steuerungsnetzwerk hineinspielen und wie sich daraus hilfreiche Behandlungsansätze für Patienten entwickeln lassen.

Bei dieser wissenschaftlichen Reise, die vor mehr als 150 Jahren in Paris begann, brachte uns die Veränderung eines einzelnen Bausteins des Prothrombin-Gens auf eine entscheidende Spur. Sie hat zu ungeahnten Entdeckungen geführt und ist nun auf bestem Weg, sogar wichtige Grundlagen des Tumorwachstums aufzuklären.

DIE AUTOREN

Matthias W. Hentze ist Associate Director des Europäischen Laboratoriums für Molekularbiologie (EMBL) und Professor für Molekulare Medizin an der Universität Heidelberg. **Andreas E. Kulozik** ist Professor für Kinderheilkunde und Jugendmedizin und Ärztlicher Direktor der Klinik für Kinder- und Jugendmedizin III am Universitätsklinikum Heidelberg. Die beiden Forscher gründeten 2002 die Molecular Medicine Partnership Unit (MMPU) der Universität Heidelberg und des EMBL, der sie gemeinsam vorstehen.

QUELLEN

Danckwardt, S. et al.: p38 MAPK Controls Prothrombin Expression by Regulated RNA 3' End Processing. In: Molecular Cell 41, S. 298–310, 2011
Danckwardt, S., Hentze, M. W., Kulozik, A. E.: 3' End mRNA Processing: Molecular Mechanisms and Implications for Health and Disease. In: EMBO Journal 27, S. 482–498, 2008
Gehring, N. H. et al.: Increased Efficiency of mRNA 3' End Formation: A New Genetic Mechanism Contributing to Hereditary Thrombophilia. In: Nature Genetics 28, S. 389–392, 2001

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1152344**

Jetzt im Handel

Einige Verbindungen halten ewig, andere nur Sekunden: alles eine Frage der Chemie.

Heft 8,50 € –
mit DVD 15,90 €*

* Heft ohne DVD: 8,50 € (A: 9,80 €/CH: 17,60 sfr).
Heft mit DVD: 15,90 € (A: 17,90 €/CH: 33,00 sfr).

www.geokompakt.de

Man kann nie genug wissen. GEOkompakt

PALÄONTOLOGIE

Der Untergang der Höhlenbären

Dass der moderne Mensch die gigantischen Bären in Europa vor 30 000 Jahren noch antraf, bezeugen Bilder in der Chauvet-Höhle in Südfrankreich. Dort hinterließen die Tiere auch direkte Spuren ihres Aufenthalts – einschließlich zahlreicher Skelette, die teils sogar noch DNA enthalten. Diese Funde geben heute Aufschluss über ihr Aussterben.

Von Jean-Marc Elalouf und Valérie Féruglio

MCC, CNP, PÉRIGUEUX

Hier porträtierten Künstler der Kulturstufe des Aurignacien eindeutig einen Höhlenbären.

Als der moderne Mensch vor 40 000 Jahren nach Europa kam, lagen weite Bereiche des Kontinents unter Eismassen begraben. In Südfrankreich reichten die Alpengletscher damals bis ins Gebiet von Lyon. Viele der großen eiszeitlichen Tierarten sind heute ausgestorben. Manche von ihnen gab es noch, als diese Kaltzeit vor gut 11 000 Jahren zu Ende ging. Die letzten Mammuts etwa lebten im Norden Sibiriens noch ein paar tausend Jahre lang. Auerochsen, von denen die Hausrinder abstammen, kamen hier zu Lande sogar noch im Mittelalter vor: Der letzte Ur verstarb im frühen 17. Jahrhundert in Osteuropa. Aber andere große Säugetiere verschwanden schon während oder vor dem Ende der letzten Vereisung – ebenfalls die Höhlenhyäne und der Höhlenbär.

Wohl jeder hat schon von dem riesigen Bären namens *Ursus spelaeus* (nach griechisch spelaion: »Höhle«) gehört, hat vielleicht eine der auch in Deutschland und im Alpengebiet zahlreichen »Bärenhöhlen« besucht, eines seiner Skelette oder eine Nachbildung der Kolosse bestaunt. Wegen der großen Knochen sprach der Volksmund früher gern von Drachenhöhlen. Das spektakulärste, für Wissenschaftler wohl bisher aufschlussreichste solche Naturmuseum dürfte die erst 1994 entdeckte Grotte Chauvet im Tal der Ardèche in Südfrankreich darstellen, deren zahlreiche steinzeitliche Felsmalereien Aufsehen erregten. Prähistorische Künstler haben das Tier dort vor 30 000 Jahren an die Wände und Decken gezeichnet.

Der »Neandertaler unter den Bären« stand **kurz vor seinem Ende**, als der moderne Mensch ihn verewigte

Als Teil einer Ansammlung von 420 Tierbildern haben sich 13 Darstellungen dieses Bären erhalten. Dass er sich auch selbst im Innern der verzweigten Höhle aufhielt, belegen zahlreiche Spuren und Hinterlassenschaften. Dazu zählen mindestens 4000 Knochen von ungefähr 200 Höhlenbären, die teils sogar noch DNA-Reste enthalten.

Kein anderer bekannter Ort hält so viel Forschungsmaterial zu dieser Art bereit, deren Geschichte ein wenig der des Neandertalers gleicht: Sie trat in Europa etwa zur selben Zeit wie der stämmige Frühmensch in Erscheinung und verschwand ebenfalls während der letzten Vereisung. Daher könnte man *Ursus spelaeus* den Neandertaler unter den Bären nennen. Er stand vermutlich schon kurz vor dem Aussterben, als *Homo sapiens*, der moderne Mensch, ihn in der Grotte Chauvet in Bildern verewigte.

Jene Künstler lebten als Jäger und Sammler in nomadischen oder halbnomadischen Gruppen. Von ihrem Alltag und ihrer materiellen Kultur zeugen diverse Hinterlassenschaften an ihren Lagerstätten, die sich oft geschützt unter Felsvorsprüngen befanden, teils aber auch im Freien. Wir wissen von daher, welche Tiere sie erlegten und welche Waffen und Geräte sie benutzten. Höhlen bewohnten diese Menschen nur gelegentlich. Doch gerade dort ist an den Bildern zu sehen, dass ihre Auffassung von Tieren schon damals über das reine Betrachten als Beute hinausging. Denn die künstlerischen Darstellungen repräsentieren nicht zwangsläufig gejagte Arten. Der Höhlenbär etwa gehörte kaum ins Beuteschema.

Die teils sehr deutlich ausgearbeiteten Tierbilder entstanden mit unterschiedlichsten Techniken. Sie lassen einiges von der spirituellen Welt ihrer Schöpfer erahnen. Manche Mythen mögen dort ihre Wurzeln haben und wurden von späteren Kulturen nur immer wieder abgewandelt. Die Darstellungen speziell des Höhlenbären sind aber auch für Biologen aufschlussreich, denn mit ihnen haben die prähistorischen Menschen eine heute ausgestorbene Art verewigt.

Johann Friedrich Esper (1732–1781) gilt als der erste moderne Naturforscher, der Knochen von Höhlenbären in einer wissenschaftlichen Abhandlung beschrieb. 1771 fand der Theologe Unmengen davon bei Burggaillenreuth in der fränkischen Schweiz in der Zoolithenhöhle, benannt nach dem damals gebräuchlichen Ausdruck für Tierfossilien. Er hielt sie für Skelettreste von Eisbären. Vor ihm glaubte man sogar an Menschenknochen. Die systematische Einordnung und wissenschaftliche Namengebung besorgte 1794 der Mediziner Johann Christian Rosenmüller (1771–1820), der ebenfalls die Gaillenreuther Höhle besuchte.

Der Höhlenbär unterschied sich wegen einiger charakteristischer anatomischer Besonderheiten eindeutig von heutigen Bären – selbst vom nahe verwandten Braunbären *(Ursus arctos)*, der damals ebenfalls in Europa vorkam und heute in mehreren Unterarten, darunter dem Grizzly, in Eurasien und Nordamerika verbreitet ist.

Zunächst fällt die oft beachtliche Größe auf. Stand ein Höhlenbär auf allen vieren, betrug die Schulterhöhe vieler Tiere am Widerrist 1,20 Meter. Richtete er sich auf die Hinterbeine auf, reichte er mit seinen Pranken drei Meter hoch. Europäische Braunbären sind deutlich kleiner. Auch die Dicke der Beinknochen, die das Gewicht tragen mussten, beein-

AUF EINEN BLICK

ALLMÄHLICHES AUSSTERBEN

1 Der Höhlenbär, *Ursus spelaeus*, war **kein Vorfahr des Braunbären**. Er entstand vor rund 300 000 Jahren, lebte in Europa und in angrenzenden Gebieten Asiens und starb vor spätestens 15 000 Jahren aus.

2 Die in den 1990er Jahren entdeckte **Chauvet-Höhle in Südfrankreich** bietet in vieler Hinsicht reiches Forschungsmaterial zu dem riesigen Pelztier. Einerseits überwinterten diese Bären darin, andererseits malten Menschen dort vor 30 000 Jahren von ihnen **detailgetreue Bilder** an die Wände.

3 Noch ist nicht klar, warum die Höhlenbären bald darauf verschwanden. Menschliches Zutun dürfte hierzu nur marginal beigetragen haben, denn schon damals war ihre **genetische Vielfalt** sehr gering. Vielleicht wurde ihnen schließlich ihre besondere Lebensweise zum Verhängnis.

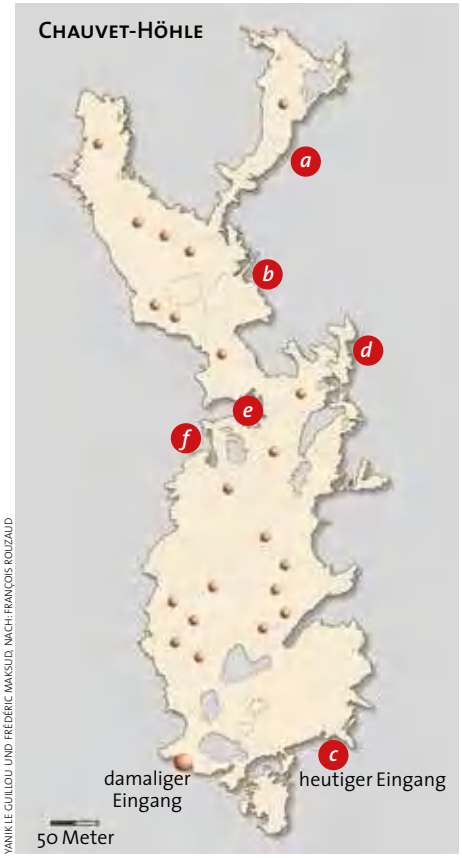
druckt. Demnach dürften die Kolosse fast dreimal so viel gewogen haben wie Braunbären. Männliche Tiere, die wie bei allen Großbären viel größer und massiger als die Weibchen waren, brachten es vermutlich auf 500 Kilogramm. Dabei gab es allerdings beträchtliche individuelle Unterschiede: An einigen Orten fand man vergleichsweise kleine Skelette.

Der Höhlenbär wich zudem vom Braunbären in seiner Kopf- und Körperform ab. Das haben die Steinzeitkünstler der Grotte Chauvet ziemlich naturgetreu festgehalten. Manchmal zeichneten sie nur den Kopf, an dem besonders auffällt, dass die Stirn eine markante Stufe bildet, während der Braunbär eine fliehende Stirn hat. Die obere Schnauzenpartie ist vorn im Profil sehr breit und leicht gerundet, was an Kufen eines Schaukelstuhls erinnert, und die Nasenlöcher weisen eher nach oben. Die Augenhöhlen im Schädel sind relativ kleiner als beim Braunbären. Somit besaß der Höhlenbär wahrscheinlich noch kleinere Augen als dieser. Im dichten Fell waren sie sicherlich kaum zu sehen. In der Tat haben die Menschen sie nicht mit abgebildet. Die Zeichnungen des ganzen Tiers geben zudem eine Vorstellung von der eindrucksvollen Gesamterscheinung des Höhlenbären mit den kräftigen Beinen und dem abfallenden Rücken, denn die hinteren Beine waren kürzer als die vorderen.

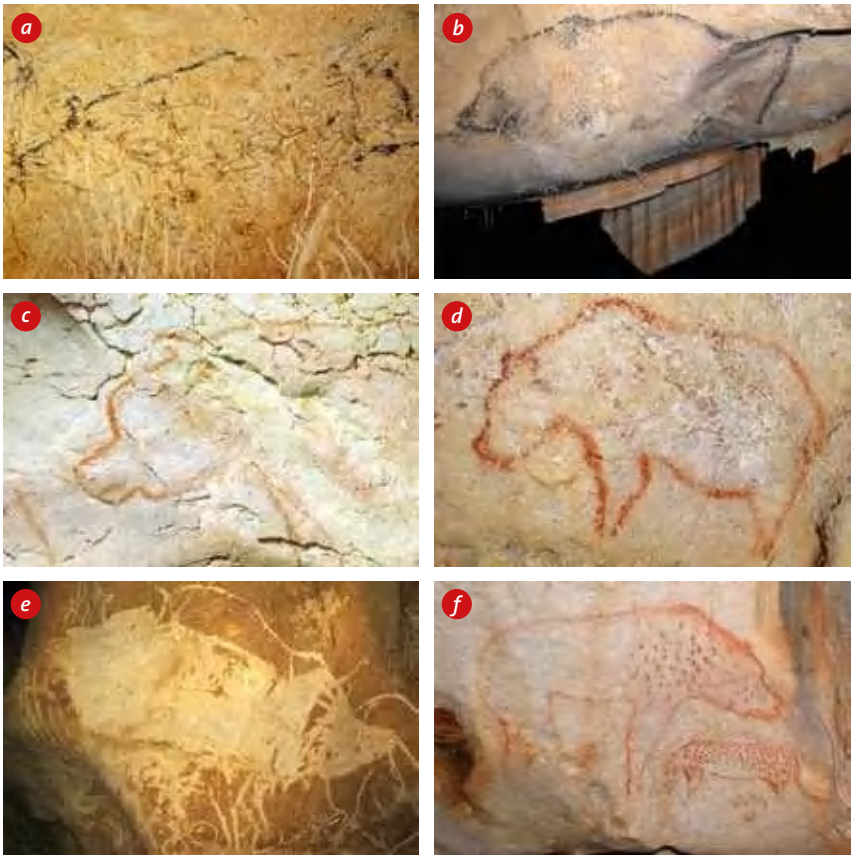
In Bärenhöhlen liegen gewöhnlich nur wenig Knochen von anderen Säugetieren, auch nicht von Braunbären. Demnach stießen die meisten Arten selten bis in solche Tiefen vor. Außerdem mieden die Höhlenbären und die Hyänen offenbar die unterirdischen Rückzugsorte der jeweils anderen Art, denn Bärenhöhlen enthalten kaum Hyänenspuren und umgekehrt. Dass fast alle entdeckten Überreste von *Ursus spelaeus* aus Höhlen stammen, bedeutet allerdings nicht, dass sich diese Bären das ganze Jahr über darin aufhielten. Aber sie überwinterten darin – im Gegensatz zu Braunbären, die sich lieber in Mulden oder Löcher unter toten oder umgefallenen Bäumen zurückziehen.

Typisch für Bärenhöhlen: Die Spuren vieler Generationen auf engem Raum

Ihre Verbreitung beschränkte sich weit gehend auf Europa einschließlich Großbritanniens, das in Kaltzeiten mit dem Kontinent verbunden war. Wo sich leicht Höhlen bildeten, also besonders in Karstgebieten, findet man vielerorts ihre Überreste. In warmen Phasen hinterließen diese Bären in den Alpen noch in über 2000 Meter Höhe Skelette, waren dort aber kleinwüchsig. Vielerlei ganz verschiedenartige Funde und Indizien belegen ihre Anwesenheit in einer Höhle



YANIK LE GUILLOU UND FRÉDÉRIC MAKSUD, NACH: FRANÇOIS ROUZAUD

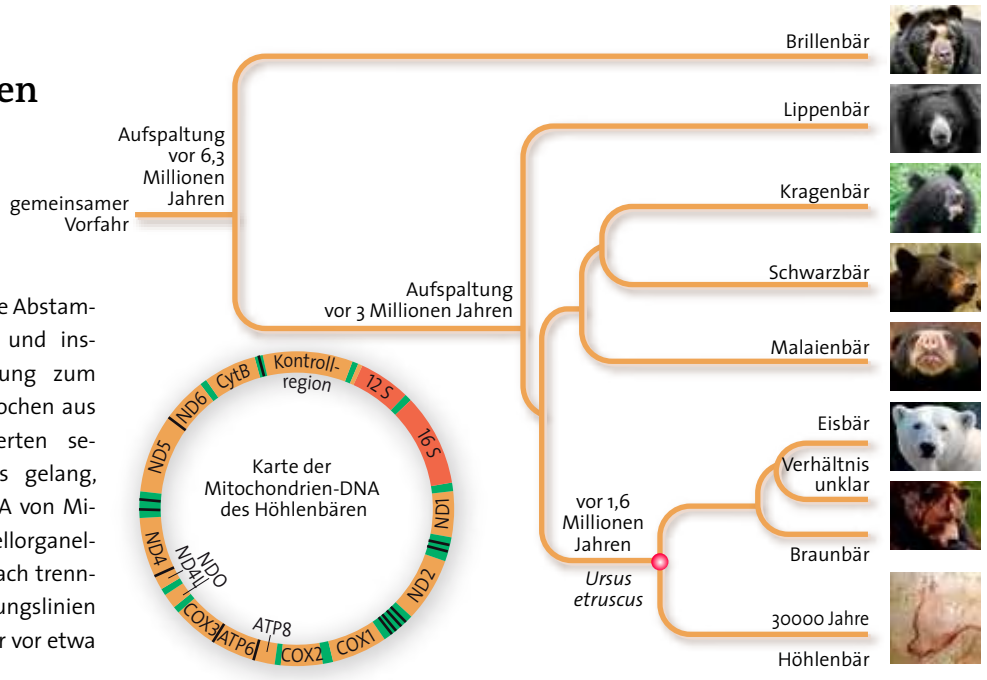


MINISTÈRE DE LA CULTURE ET DE LA COMMUNICATION (MCC), CENTRE NATIONAL DE PRÉHISTOIRE (CNP) PÉRIGUEUX

Die auf über 500 Metern gut zugängliche Höhle weist rund 400 Bilder aus der Altsteinzeit – aus dem frühen Jungpaläolithikum – auf, darunter 13 von Höhlenbären. Auf der Karte sind die Orte markiert, wo Bären Abdrücke hinterließen (kleine rote Kugeln), sowie die Stellen der hier gezeigten Darstellungen (a bis f).

Auf einem der beiden mit Kohle gezeichneten »schwarzen« Bären (a und b) sieht man Kratzer von Bärenklauen (a). Die »roten« Bären (c und d) wurden mit Ocker gemalt. Auf einer Wand aus bröckelndem Material findet sich ein undeutlicheres Profil (e). Das Fell eines neugierigen Bären (f) wurde mit Flecken markiert.

Abstammung des Höhlenbären



GRAFIK: POUR LA SCIENCE; FOTOS: SHUTTERSTOCK – VON OBEN NACH UNTEN: CHRISTIAN MUSAT; ERIC GEVAERT; NGARABE; MATT TILGHMAN; VLADIMIR WRANGEL; BODILISS; NEELSKY; MCC; CNP PERIGEUX

DNA-Vergleiche halfen, die Abstammung des Höhlenbären und insbesondere seine Beziehung zum Braunbären zu klären. Knochen aus der Chauvet-Höhle lieferten sequenzierbares Erbgut. Es gelang, daraus die komplette DNA von Mitochondrien genannten Zellorganellen zu erschließen. Demnach trennten sich die Abstammungslinien von Braun- und Höhlenbär vor etwa 1,6 Millionen Jahren.

über viele Generationen, allem voran Knochen von nicht selten Hunderten, ja Tausenden von Tieren. Zudem kann der Untergrund versteinerte Abdrücke der Pranken aufweisen sowie hunderte Mulden, die sich die Bären zum Winter hin scharrten. Die Wände tragen unzählige Kratzer ihrer Klauen, und manche Stellen, an denen sich die Petze häufig vorbeischoben, hat ihr Fell glatt poliert. So wurden auch einige Bilder in der Grotte Chauvet teilweise regelrecht wegradiert.

Spuren irgendwelcher Beutetiere hinterließen die Höhlenbären im Winterquartier nicht. Die Giganten waren zwar Allesfresser, aber schon vom Gebiss her noch mehr als andere Bären an vegetarische Kost angepasst. Ihre Zähne und Kiefer eigneten sich weniger zum Zerschneiden von Fleisch als zum Malmen von Früchten und anderer Pflanzennahrung. Diese vorherrschende Ernährungsweise spiegelt sich auch in der Isotopenzusammensetzung ihres Knochenkollagens. Insbesondere gleicht der Gehalt des schweren Stickstoffisotops 15 mehr dem von Pflanzen- als dem von typischen Fleischfressern.

> Wo die Bären sich oft dicht vorbeischoben, haben sie **mit ihrem Fell Bilder »wegradiert«**

Allerdings präsentiert sich heute längst nicht jede einstige Bärenhöhle so eindrucksvoll mit all den verschiedenen Indizien vom Aufenthalt des mächtigen Tiers wie gerade beschrieben. Mancherorts, etwa in der Dordogne, hat der saure Boden die Knochen zersetzt. Ebenso haben Fußabdrücke und Schlafmulden nicht immer überdauert. Manchmal waren daran natürliche Ereignisse wie Überflutungen schuld, manchmal auch der Mensch. Wenn eine solche Höhle in späteren Phasen zugänglich blieb, haben sich dort natürlich Menschen immer wieder eingefunden und ihre eigenen Spuren hinterlassen – einschließlich Graffiti aus jüngerer Zeit, wie etwa in den Höhlen von Arcy-sur-Cure in Burgund, Niaux in den Pyrenäen oder Rouffignac in der Dordogne, die alle eindrucksvolle prähistorische Wandverzierungen aufweisen. Viel krasser hat der Mensch solche Stätten allerdings verändert, wenn er die phosphatreichen Ablagerungen abbaute, die auf die vielen Bärenkadaver zurückgehen. In Lascaux wiederum wurde der Untergrund umgestaltet, um Wege für die Besuchermassen anzulegen.

Ein so guter Erhalt der vielartigen Spuren und Hinterlassenschaften des Höhlenbären wie in der Chauvet-Höhle ist daher selten. Dass an den Wänden außerdem Bilder von ihm zu sehen sind, steigert den wissenschaftlichen Wert des Fundorts auch für biologische und Evolutionsstudien nochmals beträchtlich. Denn die modernen Menschen der oberen Altsteinzeit waren die ersten und letzten von uns, die diesen Tieren begegnet sind.

Bis vor Kurzem konnten Systematiker für die Rekonstruktion der Evolutionsgeschichte und die systematische Einordnung von *Ursus spelaeus* allein auf Zähne, Schädel- und Skelettmerkmale lebender und fossiler Bären zurückgreifen. Mittlerweile liegen auch verschiedene DNA-Sequenzen von Höhlenbären vor, die dieses Material ergänzen und einige neue Erkenntnisse brachten. Als Erstes gelang es mit einem Knochen aus der Grotte Chauvet, DNA der Mitochondrien zu gewinnen – der Organellen für die Zellatmung – und davon die komplette Sequenz zu bestimmen. Dieses Erbgut, das nur

MINISTÈRE DE LA CULTURE ET DE LA COMMUNICATION (MCC), CENTRE NATIONAL DE PRÉHISTOIRE (CNP) PÉRIGUEUX

Diese über 30 000 Jahre alte Zeichnung lässt gut erkennen, dass Höhlenbären eine andere Kopf- und Körperform hatten als Braunbären. Ihre Schnauze war im Profil sehr hoch, sie besaßen eine stufenförmige Stirn, und der Rücken fiel nach hinten stark ab. Sie hatten sehr kleine Ohren und Augen – Letztere wurden nicht gemalt. Auf den Schultern saß ein Fetthöcker für Winterspeck.

die Mutter weitergibt, wird für Evolutionsanalysen besonders gern herangezogen und lässt sich auch aus Fossilien vergleichsweise leicht extrahieren. Es ist viel weniger umfangreich als die DNA des Zellkerns und kommt in Zellen sehr viel häufiger vor. Manche Abschnitte verändern sich im Verlauf der Evolution rasch und mit einer bestimmten Rate, was Forscher für systematische Vergleiche nutzen.

Die Entstehung des Höhlenbären – ein evolutionsbiologisches Rätsel

Nach dem derzeitigen Kenntnisstand zweigten sich die Vorfahren der Echten Bären vor rund 30 Millionen Jahren von anderen Raubtieren ab. Anfangs waren das nur etwa waschbärgroße Arten – aber in den verschiedenen Linien, die sich bildeten, wurden die Tiere bald größer. Wann die Art *Ursus spelaeus* zuerst auftrat und wie sie mit den anderen Bärenspezies verwandt ist, war in der Forschung lange umstritten. Insbesondere die Beziehung zum Braunbären, dem der Höhlenbär verwandtschaftlich offenbar nahestand, war unklar. Frühere Paläontologen entwarfen dazu verschiedenste Szenarien. Mal hielten sie den Höhlenbären für einen Vorfahren des Braunbären, dann wieder glaubten sie, er sei ein Seitenzweig eines frühen Braunbären. Nach heutigem Wissen entstanden die beiden Arten getrennt voneinander und zu unterschiedlicher Zeit. Ihr letzter gemeinsamer Vorfahr war wahrscheinlich *Ursus etruscus*, eine einst bedeutende Spezies, die vor rund 3 bis vor 1,2 Million Jahren in Europa und Asien verbreitet war.

BEIDE FOTOS: MCC, CNP PÉRIGUEUX

Abdrücke zweier »Sohlengänger« in der Grotte Chauvet: von einem Menschen (links) und von einem Bären. Wahrscheinlich suchte *Homo sapiens* diese Höhle nur im Sommer auf – wenn er keine Bären antraf.

Der Braunbär, *Ursus arctos*, erschien wesentlich früher als der Höhlenbär. Die ältesten Fossilien von ihm sind 900 000 Jahre alt. Er stammt aus Asien, eroberte später aber viele Regionen der Alten Welt sowie Nordamerika und bildete dabei eine Reihe von recht verschiedenen regionalen Linien. Zu den größten Vertretern gehören der Grizzly und der Kodiakbär. Viel kleiner sind die Bären Südeuropas und Vorderasiens. Von Braunbären stammt der Eisbär *(Ursus maritimus)* ab, der einzige reine Fleischfresser unter den Bären. Laut einer neuen Studie erfolgte die Trennung nicht erst vor 150 000 Jahren, wie zuletzt angenommen, sondern schon vor etwa 600 000 Jahren. Noch immer können sich beide miteinander fortpflanzen, was anscheinend sogar in der Wildnis gelegentlich vorkommt.

Höhlenbären in einem weiten Sinn traten viel später auf als die Braunbären. Der eigentliche Höhlenbär erschien sogar erst vor etwa 300 000 Jahren. Sein unmittelbarer Vorfahr war die ausgestorbene Art *Ursus deningeri*. Nach den genetischen Analysen lebte der letzte gemeinsame Vorfahr mit dem Braunbären etwa 1 Million bis 2,1 Millionen Jahre vor unserer Zeit, am wahrscheinlichsten vor rund 1,6 Millionen Jahren.

Ursus spelaeus existierte demnach nur eine recht kurze Zeitspanne. Wann verschwand die Art – und vor allem warum? Nach bisheriger Auffassung waren Höhlenbären vor

MINISTÈRE DE LA CULTURE ET DE LA COMMUNICATION (MCC), CENTRE NATIONAL DE PRÉHISTOIRE (CNP) PÉRIGUEUX

In vielen Bärenhöhlen liegen Unmengen an Schädeln und Skeletten von *Ursus spelaeus* wie hier in der Grotte Chauvet. Die Tiere müssen dort im Winter gestorben sein – alters- oder krankheitsbedingt, aber manchmal wohl auch, weil sie sich nicht genügend Reserven hatten zulegen können. Skelette von Neugeborenen zusammen mit Bärinnen zeigen, dass die Geburten während der Winterruhe stattfanden.

30 000 Jahren noch zahlreich. Aber bald darauf nahm ihr Vorkommen anscheinend rapide ab. Die Meinungen, wann die Art dann tatsächlich ausstarb, klaffen allerdings teils weit auseinander: ob vor 24 000 oder vor 10 000 Jahren oder irgendwann dazwischen.

Um hier genauere Ergebnisse zu erhalten, haben wir anhand der Mitochondrien-DNA die genetische Vielfalt von einer Reihe Tieren aus zwei Höhlen im Ardèchetal ausgewertet: der Grotte Chauvet sowie der einige Kilometer entfernten Grotte des Deux-Ouvertures. Verblüfft stellten wir fest, dass die untersuchten Bären nur zwei mütterlichen Linien angehörten. Das ist umso bemerkenswerter, als das untersuchte Material die Zeitspanne von vor 27 000 bis 32 000 Jahren umfasst, also mehrere Jahrtausende. Die Grotte Chauvet birgt zwar auch noch ältere Höhlenbärfossilien, doch die enthalten keine DNA mehr.

Aufschlussreich sind Vergleiche mit anderen Regionen und älteren Zeitphasen. Forscher haben beispielsweise rund 45 000 Jahre alte Höhlenbärfossilien aus Südwestrumänien von der Peştera cu Oase untersucht – der »Knochenhöhle«, in der sich auch die bisher ältesten Fossilien moderner Menschen in Europa fanden. Sie stellten dort für einen ebenfalls nur wenige Jahrtausende umfassenden Abschnitt eine wesentlich größere genetische Vielfalt der Bären fest als wir im Raum der Ardèche. Die rumänische Population muss zu jener Zeit sehr viel umfangreicher und somit »gesünder« gewesen sein als die spätere von uns untersuchte in Südfrankreich. Sie dürfte zehnmal so viele fortpflanzungsfähige Tiere umfasst haben. Verschiedene Studien zu Höhlenbären in anderen Gebieten lassen einen ähnlich großen Unterschied vermuten. Es sieht so aus, als ob die Art im Gebiet der Ardèche vor 30 000 Jahren bereits vom Aussterben bedroht war.

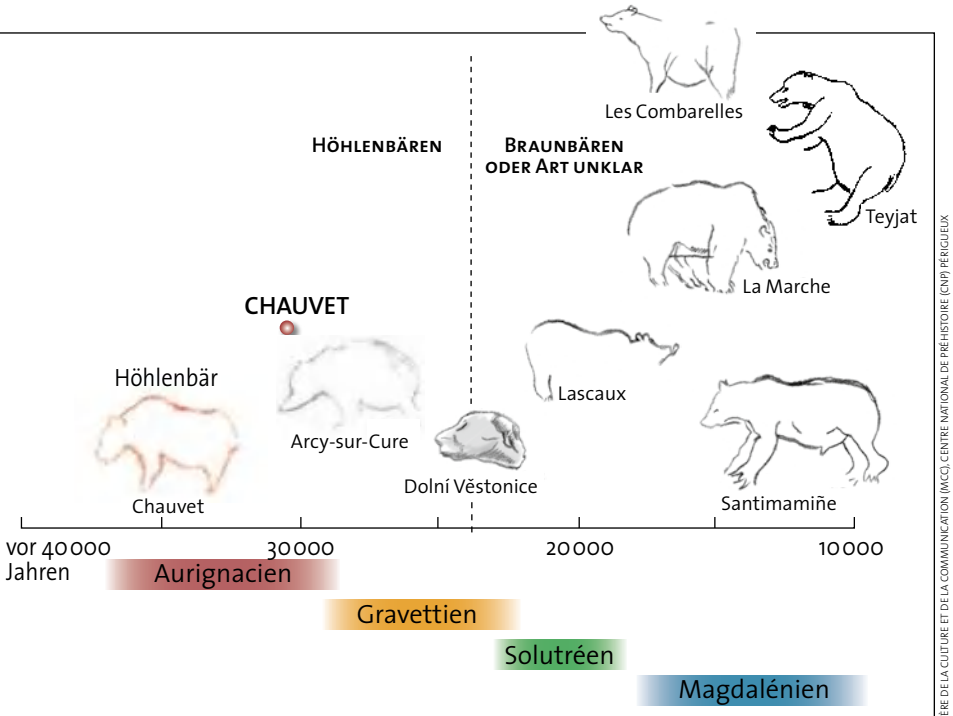
Die Unzahl von Skeletten täuscht

Die große Anzahl von Höhlenbären, die in der Grotte Chauvet verendet sind, darf nicht täuschen: 200 Tiere mögen viel erscheinen, aber damit sich während 4000 Jahren so viele Skelette ansammelten, musste dort nur alle 20 Jahre ein überwinternder Bär sterben. Vielleicht lebten in dem Gebiet gar nicht mehr viele Exemplare, als Menschen des Aurignacien sie abbildeten – so bezeichnen Archäologen die Kulturstufe des modernen *Homo sapiens* vor rund 28 000 bis 35 000 Jahren. Schon bald danach könnte die Art in der Region verschwunden sein.

Auch vor 25 000 bis 27 000 Jahren, in einer Phase des nachfolgenden Gravettien, besuchten Menschen wieder die Chauvet-Höhle und hielten sich dort in denselben Abschnitten auf wie ihre Vorgänger. Vielleicht haben sie die merkwür-

Die letzten Zeugen

Spätestens nach der Gravettien-Kultur haben altsteinzeitliche Künstler anscheinend keine Höhlenbären mehr gemalt – zumindest deren charakteristische Züge nicht mehr deutlich herausgearbeitet. Die Bilder in den Höhlen erinnern nun an Braunbären. *Ursus spelaeus* war damals vermutlich bereits ausgestorben. Die Darstellung von Dolní Věstonice ist allerdings schwer zuzuordnen.



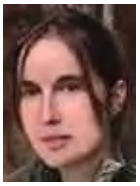
MINISTÈRE DE LA CULTURE ET DE LA COMMUNICATION (MCC), CENTRE NATIONAL DE PRÉHISTOIRE (CNP) PÉRIGUEUX

digen gezeichneten Geschöpfe bestaunt, die Braunbären nicht so richtig ähnelten. Denn aus eigener Anschauung kannten die Steinzeitkünstler dieser Zeit *Ursus spelaeus* oft wohl gar nicht mehr genau. Ob sie einfach nicht mehr naturgetreu malten oder ob sie nun Braunbären abbildeten, ist unklar. Zumindest haben sie die Charakteristika von Höhlenbären nicht mehr herausgearbeitet (siehe Kasten oben).

Ob der Mensch zum Aussterben der Höhlenbären beitrug, ist nicht sicher. Als Jagdbeute spielten sie anscheinend immer nur eine untergeordnete Rolle. Auch dürfte die Konkurrenz um Höhlen nicht besonders groß gewesen sein, zumal in einem Gebiet wie an der Ardèche, wo es reichlich derartige Unterschlüpfe gibt. Außerdem spricht einiges dafür, dass die Populationen schon schrumpften, bevor der moderne *Homo sapiens* in Europa erschien. Wenn eine Art in geografisch getrennte und genetisch verarmte kleine Bestände zerfällt, drohen Inzucht und damit schwache und missgebildete Tiere, was unter Umständen das Aussterben beschleunigt.

Möglicherweise fiel der Höhlenbär aber auch seiner eigenen Lebensweise zum Opfer. Der monatelange Rückzug ins Dunkle ohne jedes Sonnenlicht, wenn die Tiere nur von ihren Fettreserven zehrten, könnte Rachitis gefördert haben. In schlechten Jahren, also gerade in Kaltzeiten, hatten sie vor dem Winter womöglich nicht immer genügend Nahrung gefunden. Im Spätherbst mussten sie wahrscheinlich auch Fleisch fressen, und das glückte ihnen vielleicht mitunter nicht in ausreichendem Maß. Um diese offenen Fragen zur Ernährungssituation der Höhlenbären zu klären, untersuchen Paläontologen nun DNA-Spuren in Koprolithen: den versteinerten Exkrementen anderer Fleischfresser, darunter Wölfe und Höhlenhyänen. Dies könnte zeigen, ob Nahrungsmangel zum Aussterben des Riesenbären beitrug.

DIE AUTOREN



Jean-Marc Elalouf ist Genetiker und Paläogenetiker am Institut de biologie et de technologies de Saclay südwestlich von Paris. **Valérie Féruglio** ist Prähistorikerin. Sie arbeitet an der Université Paris Ouest Nanterre La Défense.

QUELLEN

Bon, C. et al.: Low Regional Diversity of Late Cave Bears Mitochondrial DNA at the Time of Chauvet Aurignacian Paintings. In: Journal of Archaeological Science 38, S. 1886–1895, 2011
Bon, C. et al.: Deciphering the Complete Mitochondrial Genome and Phylogeny of the Extinct Cave Bear in the Paleolithic Painted Cave of Chauvet. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA 105, S. 17447–17452, 2008
Clottes, J.: Pourquoi l'art préhistorique? Gallimard, Paris 2011
Stiller, M. et al.: Withering away – 25,000 Years of Genetic Decline Preceded Cave Bear Extinction. In: Molecular Biology and Evolution 27, S. 975–978, 2010

LITERATURTIPPS

Chauvet, J.-M. et al.: Grotte Chauvet bei Vallon-Pont-d'Arc. Altsteinzeitliche Höhlenkunst im Tal der Ardèche. Jan Thorbecke, Stuttgart 1995, 3. Auflage 2001
Bildband der Entdecker zu den grandiosen Höhlenmalereien
Rabeder, G. et al.: Der Höhlenbär. Jan Thorbecke, Stuttgart 2000
Ein Fachmann gibt einen Überblick über die Forschung zum Thema.

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1152345**

Für alle Wissbegierigen zwischen 10 und 14 Jahren, die nicht nur das »Was«, sondern auch das »Wie« und »Warum« interessiert, gibt es jetzt ***Spektrum neo***. In jeder Ausgabe wird ein großes Thema behandelt – in Heft Nr. 2: »Die Welt im Jahr 2050«.

In Zusammenarbeit mit dem Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik in Kiel

facebook

Jetzt die Heftreihe bestellen:
www.spektrum-neo.de

KERNFUSION

Schnelle Zündung für die **Trägheitsfusion**

Seit Jahren entwickeln Physiker immer stärkere Laser, mit deren Hilfe sie winzige Wasserstoffkügelchen zur Implosion bringen und auf diese Weise Energie aus Kernfusion gewinnen möchten. Unser Autor arbeitet am weltgrößten Laser, der National Ignition Facility in Kalifornien, und berichtet über Stand und Aussichten dieser Entwicklung.

Von Andreas J. Kemp

Trägheitsfusion ist eine Spielart der so genannten kontrollierten Kernfusion, in der millimetergroße Brennstoffkügelchen von Lasern mehr als 1000-fach komprimiert werden. Dadurch beginnen ab einem bestimmten Punkt Atomkerne miteinander zu verschmelzen – sie fusionieren. Der Prozess ähnelt den Vorgängen im Innern der Sonne und setzt wie dort Energie frei. Falls diese die eingesetzte Laserenergie übersteigt, lässt sich das System als Grundlage für einen Fusionsreaktor nutzen.

Weltweit arbeiten Forscher zwar seit Jahrzehnten an diesem Prinzip, und in den letzten Jahren sind beträchtliche Fortschritte erzielt worden, unter anderen an der National Ignition Facility (NIF) des Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL). Überraschenderweise ermöglichte dies quasi nebenbei ganz andere Anwendungen, etwa in der Medizintechnik, mit denen vorher niemand gerechnet hatte.

An der NIF befindet sich der bislang größte Laser der Welt. Mit ihm lassen sich bereits heute im Innern komprimierter Kügelchen, so genannter Targets, physikalische Bedingungen erzeugen, die denen im Zentrum unserer Sonne ähneln. Noch im Lauf des nächsten Jahres hoffen die Fusionsforscher zum ersten Mal, auf diese Weise ein nukleares Feuer unter Laborbedingungen zu zünden. Sollte das gelingen, liegt die eigentliche Herausforderung allerdings erst noch vor ihnen: nämlich das Gleiche mit einer Energieausbeute zu schaffen, wie sie für ein ganzes Kraftwerk erforderlich wäre.

Das ist nicht so einfach, denn die aktuelle Methode hat nur eine begrenzte Effizienz. Deshalb entwickelten Forscher ein neues Verfahren, mit dem sie einen höheren Energiegewinn bei der Trägheitsfusion erreichen können: die »schnelle Zündung« (englisch: fast ignition). Sie beruht darauf, die Fusionskügelchen (die Targets oder Pellets) zunächst zu komprimieren und dann mit sehr energiereichen und zugleich extrem kurzen Laserpulsen zu bombardieren. Die schnelle Zündung hat erheblich von der Entwicklung solcher Kurzpuls-Lasersysteme profitiert. Sie konnte aber auch überraschende Querverbindungen etwa zu neuartigen Teilchenbeschleunigern eröffnen. Zum jetzigen Zeitpunkt ist jedoch noch einiges an Grundlagenforschung notwendig, bis ein Experiment die prinzipielle Machbarkeit der Trägheitsfusion als Energiequelle demonstrieren könnte.

Ihr Grundkonzept geht bis in die 1950er Jahre zurück, schon vor die Entwicklung des ersten Rubidiumlasers im Jahr 1960. Kurz nach diesen erfolgreichen Experimenten haben Forscher am LLNL bereits das Potenzial von Lasern für die kontrollierte Kernfusion erkannt.

In einem Artikel für die Zeitschrift »Nature« im Jahr 1972 berechnete der damalige Leiter der Laserabteilung des LLNL, John Nuckolls, dass man unter optimalen Bedingungen kleinste Mengen von Plasma mit Laserenergie von einem Ki-

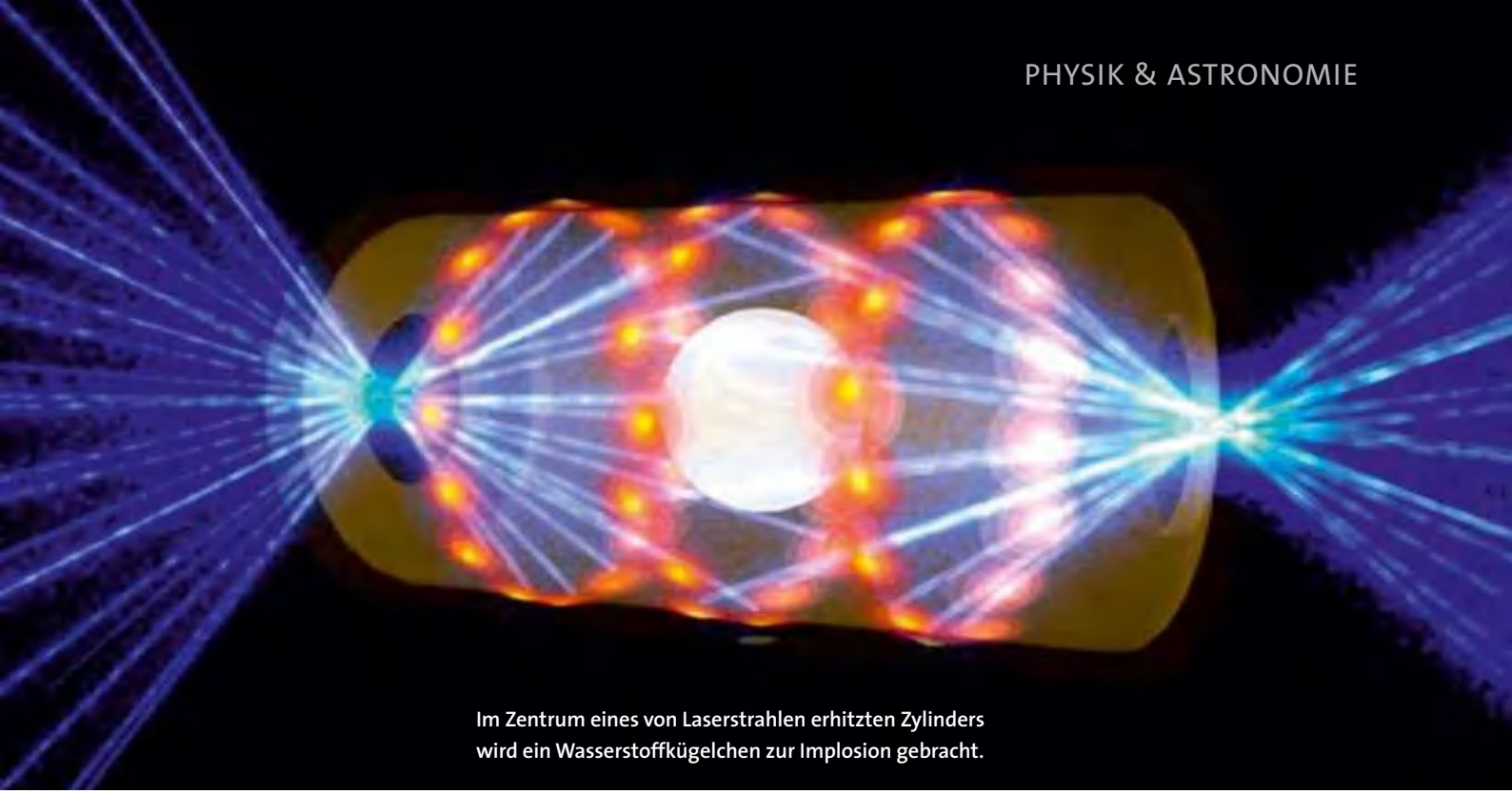
AUF EINEN BLICK

IMPLODIEREN, REAGIEREN, EXPLODIEREN

1 Seit Jahrzehnten versuchen Physiker, **gefrorene Kügelchen aus Wasserstoff** duch Beschuss mit Laserstrahlen implodieren zu lassen – und sie dabei zu komprimieren.

2 Durch die Kompression verschmelzen die Wasserstoffisotope, noch bevor ein Kügelchen wieder explodiert. Dabei wird Energie vor allem in Form **schneller Neutronen** freigesetzt.

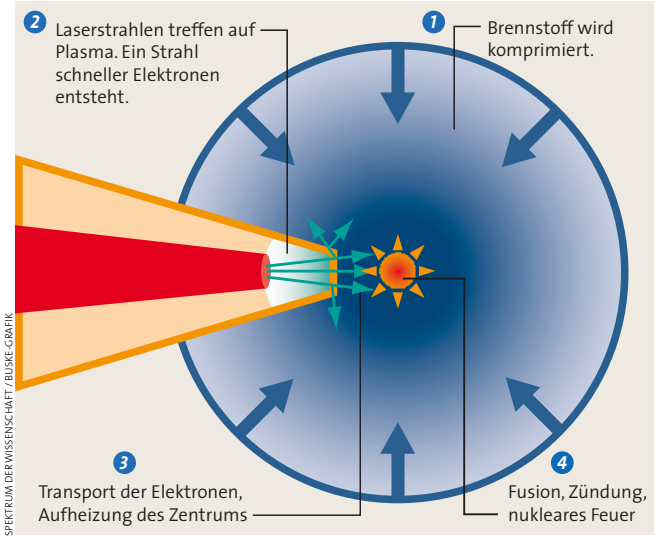
3 Die so genannte **Schnelle Zündung** soll die Effizienz des Prozesses steigern – Voraussetzung für den Bau eines späteren Fusionsreaktors.



Im Zentrum eines von Laserstrahlen erhitzten Zylinders wird ein Wasserstoffkügelchen zur Implosion gebracht.

LAWRENCE LIVERMORE NATIONAL LABORATORY

lojoule komprimieren könnte, was damals noch einen relativ großen Betrag darstellte. Dieser Standardweg zur Trägheitsfusion ähnelte ein wenig einem Dieselmotor: Eine Plastikkapsel wird mit etwa einem Milligramm an den schweren Wasserstoffisotopen – Deuterium (D) und Tritium (T) im Verhältnis 1 : 1 – gefüllt und tiefgefroren. Dieser Mix wird durch die Laserenergie blitzschnell komprimiert, bis er so dicht und heiß wird, dass der Funke zündet – und Fusionsreaktionen einsetzen können. Schon während der Implosion verlieren die meisten Atome durch die extreme Aufheizung ihre Elektronenhülle, werden also ionisiert, so dass für Sekundenbruchteile ein so genanntes Plasma entsteht. Bei den Fusionsreaktionen kollidieren Paare elektrisch positiv geladener Atomkerne derart heftig miteinander, dass sie ihre gegenseitige Abstoßung überwinden und miteinander verschmelzen. Dabei bilden sich Heliumkerne, die aus zwei Protonen und zwei Neutronen bestehen, sowie ein energiereiches Neutron. Die Heliumkerne geben ihre Energie rasch wieder an das umgebende Plasma ab. Für den Bruchteil einer Nanosekunde löst dies eine Lawine von Reaktionen aus, bei der ein Großteil des Deuterium-Tritium-Gemischs nuklear miteinander reagiert.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK

Um die notwendigen Bedingungen dafür zu erreichen, gilt es, eine exakt definierte Serie von Stoßwellen in der Brennstoffkapsel zu starten. Hierfür muss das Kügelchen äußerst symmetrisch geformt sein, mit einer Oberfläche, die bis auf tausendstel Millimeter Präzision geglättet wurde. Nur dann bleibt die Symmetrie auch während der Kompression erhalten, damit die Kapsel nicht schon während der Implosion zerbricht, noch ehe Fusionsreaktionen einsetzen.

Die NIF ist für solche Experimente hervorragend geeignet: Insgesamt 192 Laser strahlen mit einer Gesamtenergie von mehr als zwei Megajoule durch zwei kleine Öffnungen in einen Goldzylinder, in dessen Mitte die Kapsel sitzt (siehe Bilder S. 47). Das entspricht der Energie von knapp einem halben Kilogramm Sprengstoff, konzentriert auf ein winziges Kügelchen. Das Innere des Zylinderhohlraums heizt sich innerhalb weniger Nanosekunden auf über drei Millionen Grad Celsius auf, was schlagartig die äußere Hülle der Brennstoffkapsel verdampft. Ähnlich einer Rakete beschleunigt

Um in einem Wasserstoffkügelchen Fusionsreaktionen zu zünden, wird es komprimiert (1). Dann feuert ein Laserstrahl bis fast ins Zentrum des Ziels (2). Dessen Licht erzeugt einen Strahl (nahezu) lichtschneller Elektronen, die wiederum den Wasserstoff im Mittelpunkt des Kügelchens implodieren lassen (3, 4).

LAWRENCE LIVERMORE NATIONAL LABORATORY

Kalte Kugeln: An Kaliforniens National Ignition Facility werden die Targets für die Trägheitsfusion entwickelt – tiefgefrorene, zwei Millimeter große Wasserstoffkügelchen.

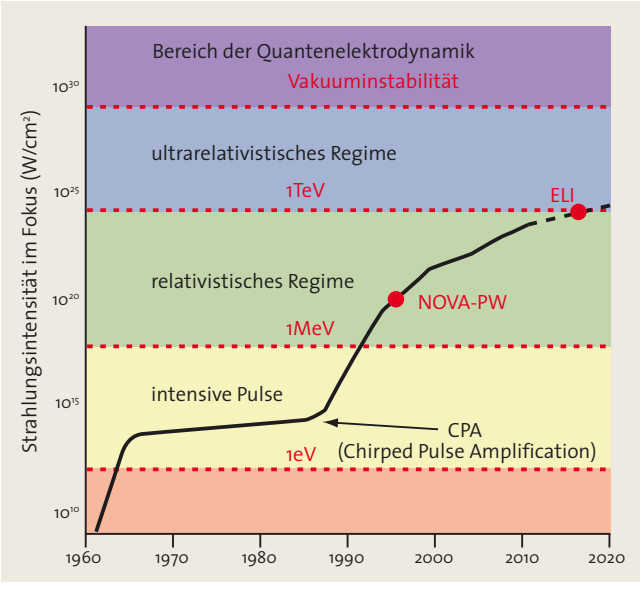
das Material der Kapsel nun konzentrisch nach innen auf ihr eigenes Zentrum zu. Nicht nur komprimiert dies den gefrorenen Brennstoff um das 1000-Fache bis zur 20-fachen Dichte von Blei, sondern es erhitzt ihn gleichzeitig bis auf über 100 Millionen Grad, was schließlich die Kernreaktionen zündet. Physiker sprechen hier von Hot-Spot-Zündung.

Neben der Brennstoffkugel erfordert auch die Laserkompression extreme Präzision. Doch selbst wenn beide Anforderungen erfüllt sind, erwarten die Experten der NIF allenfalls einen 15- bis 20-fachen Energiegewinn. Der Grund: Das Aufheizen des Brennstoffs erschwert die Kompression und reduziert ihre Effizienz gegenüber einer einfachen Implosion der Kapsel ohne Erhitzen. Wenn sich dagegen Kompressions- und Aufheizphase der Kapsel voneinander trennen ließen, könnte das die Ausbeute stark verbessern.

Dies würde auch die Anforderungen an die Präzision der Laserkompression reduzieren. Denn eine Implosion, bei der der Brennstoff nicht gleichzeitig erhitzt werden muss, kann langsamer ablaufen und würde das Zerbrechen der Kapsel unwahrscheinlicher machen. Es waren genau diese Gründe, welche die Forscher nach einem neuen Konzept für die Trägheitsfusion suchen ließen: nach der schon genannten schnellen Zündung. In den 1980er Jahren hatten der Fusionsphysiker Max Tabak und einige Kollegen vom LLNL ausgerechnet, dass eine Brennstoffkapsel mit dem neuen Verfahren bereits mit weniger als sieben Prozent der bis dahin für nötig gehaltenen Laserenergie gezündet werden könnte, also etwa 100 Kilojoule. Dabei würde der eigentliche Zündfunke, der die Fusionsreaktionen im Kugelzentrum in Gang setzt, gerade einmal zehn Prozent derjenigen Energie brauchen, die für die ganze Kompression eingesetzt wird. Der Zündfunke mit einer Energie von zehn Kilojoule könnte dann von einer externen Quelle zum komprimierten Brennstoff gelangen, ähnlich wie bei der Zündkerze im Verbrennungsmotor. Wegen der langsameren Kompression der Fast-Ignition-Kapsel ist der Energieaufwand, verglichen mit der Standardträgheitsfusion, deutlich reduziert. Weil gleichzeitig die absolute Ausbeute an thermonuklearer Energie etwa die gleiche ist, könnte damit der Energiegewinn pro Kapsel um mehr als das Zehnfache gesteigert werden. Wenn das gelänge, würde die schnelle Zündung für die Energiegewinnung wirklich attraktiv.

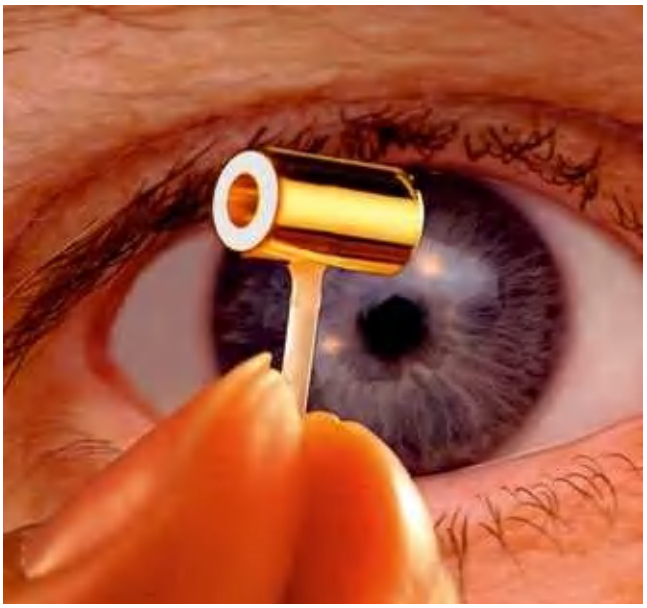
Die Sache hat aber einen Haken: Nach der maximalen Kompression der Kapsel dauert es lediglich zehn Pikosekunden (10^{-11} Sekunden), bis der Brennstoff wieder auseinanderfliegt. Die Zündenergie während dieses winzigen Zeitfensters in den Brennstoff im Zentrum des Kügelchens einzubringen, erfordert jedoch, wie eine simple Rechnung zeigt, mehr als ein Petawatt, also eine Million Gigawatt. Das klingt zunächst schlimmer, als es ist: Diese Leistung übertrifft zwar sogar das 100-Fache des Weltenergieverbrauchs, muss jedoch nur für einen aberwitzig kleinen Sekundenbruchteil erbracht werden. Dennoch handelte es sich seinerzeit um mehr als das 1000-Fache der Leistung des größten Lasersystems Ende der 1980er. Erst mit der Einführung der so genannten Chirped Pulse Amplification (CPA, etwa: Kurzpulsverstärkung) konnten Laserphysiker diese aussichtslos erscheinende Situation verändern.

Was ist Chirped Pulse Amplification? Ursprünglich wurde sie in den 1950er Jahren für einen ganz anderen Zweck erfunden, nämlich um die Intensität von Radarsendern zu erhöhen, ohne deren Verstärker zu überlasten. Die Motivation

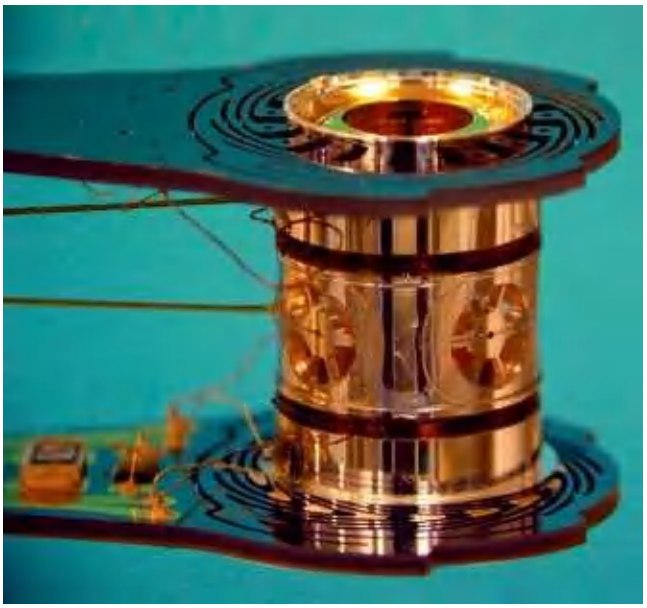


SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK

Rasante Entwicklung: In den letzten Jahrzehnten steigerte sich die Intensität der Laser über viele Größenordnungen, über den NOVA-Petawatt zur geplanten Extreme Light Infrastructure ELI.



LAWRENCE LIVERMORE NATIONAL LABORATORY



LAWRENCE LIVERMORE NATIONAL LABORATORY

Der ein Zentimeter lange Hohlraumzylinder nimmt die tiefgefrorene Fusionskapsel auf. Dann wird mit 192 Lasern durch die seitlichen Öffnungen in den Hohlraum geschossen, dessen Wände sich rasch erhitzen. An den Innenwänden verwandelt sich das Laserlicht in Röntgenstrahlung, die die Kapsel implodieren lässt. Dabei wird sie 20-mal dichter als Blei und erhitzt sich auf 100 Millionen Grad, wo die Fusion zündet.

dafür war der Bedarf nach größerer Reichweite und Zuverlässigkeit der Sender. Der französische Laserpionier Gérard Mourou und seine Mitarbeiterin Donna Strickland von der University of Michigan führten diese revolutionäre Technologie 1987 in die Welt der Kurzpulslaser ein und ermöglichten damit besonders hohe Intensitäten.

Konventionelle gepulste Lasersysteme speichern Energie, indem Atome im Lasermedium auf optischem oder chemischem Weg angeregt werden. Ein Saatpuls beginnt dann die gespeicherte Energie in Photonen der gleichen Wellenlänge umzuwandeln, die »stimulierte Emission«. Während der Puls durchs Lasermedium fliegt, fügen Kaskaden von derart stimulierten Emissionen immer mehr Photonen hinzu, bis der ganze Puls aus dem Medium ausgekoppelt und zur Targetkammer geleitet wird. Dieses Prinzip ist jedoch nur bis zu einer gewissen Leistung nutzbar – wegen der physikalisch unvermeidlichen Selbstfokussierung. Dabei handelt es sich um einen nichtlinearen optischen Effekt, bei dem die Front des Laserstrahls den Brechungsindex im Lasermedium so verändert, dass der Rest des Strahls fokussiert (also stärker gebündelt) wird und wegen der verstärkten Energiekonzentration damit im Lasermedium Hitzeschäden verursacht.

Die Chirped Pulse Amplification umgeht dieses Problem, indem sie den Photonenfluss im Lasermedium stets unter der Schwelle für Selbstfokussierung hält. In einem CPA-Verstärker wird der Puls zeitlich gestreckt, indem er durch Paare von Beugungsgittern fliegt – Metallplatten mit feinen, gleichmäßig aufgetragenen Rillen. Diese brechen einfallendes Licht in seine verschiedenfarbigen Komponenten, ähnlich wie das Farbspektrum, das man auf der Oberfläche einer CD sieht. Wahrend ein kontinuierlicher Laserstrahl einfarbig sein kann, besteht ein gepulster Strahl immer aus vielen Farben beziehungsweise Wellenlängen. Die unterschiedlichen Farben des Kurzpulslichts werden vom ersten Gitter in verschiedene Richtungen reflektiert und treffen dann auf ein zweites, das parallel zum ersten ausgerichtet ist.

Dieses schickt alle Farben wieder in die gleiche Richtung, aber mit einer zeitlichen Verzögerung. Indem man den Abstand zwischen den Gittern verändert, kann man den Puls so bis zu 10 000-fach dehnen, von Pikosekunden bis zu mehreren Nanosekunden. Das reduziert den Photonenfluss drastisch, und man kann den Lichtstrahl viel mehr verstärken als ohne diesen Trick. Danach gelangt der Puls durch ein zweites Gitterpaar, das die Streckung umkehrt und damit die ursprüngliche Länge des Pulses wiederherstellt.

Elektronen werden in drei Femtosekunden auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt

In den 1990er Jahren konnten die Forscher mit der Chirped Pulse Amplification die Spitzenintensität von gepulsten Lasersystemen dramatisch steigern. Während für die konventionelle Trägheitsfusion in den letzten 20 Jahren immer energiereichere Laser mit Intensitäten um 10^{15} Watt pro Quadratzentimeter entwickelt wurden, führte die Entwicklung der CPA-Technologie zu relativ kompakten Infrarotlasern, die ohne Probleme bis zur so genannten relativistischen Schwelle von 10^{18} Watt pro Quadratzentimeter gelangten.

Bei dieser Intensität und einer Wellenlänge von einem Mikrometer, was infrarotem Licht entspricht, wird im Laserfokus alles Material fast unmittelbar ionisiert, und die Elekt-

ronen beschleunigen innerhalb einer einzigen Laserperiode von $3 \cdot 10^{-15}$ Sekunden auf beinahe Lichtgeschwindigkeit (siehe Kasten unten). In den nächsten Jahren erwarten Forscher sogar, noch bis zu 100 000-mal höhere Intensitäten zu erreichen. Damit würden sie in einen Bereich gelangen, wo nicht nur die leichten Elektronen, sondern auch die wesentlichen schwereren Wasserstoffkerne (Protonen) innerhalb einer Laserperiode auf fast Lichtgeschwindigkeit kommen.

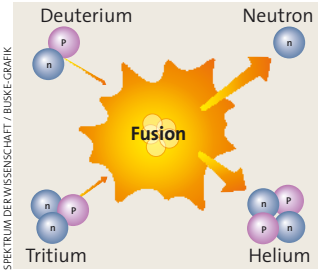
Bei Spitzenintensitäten von 10^{24} Watt pro Quadratzentimeter erreicht die Energie des Laserfelds im Fokus bereits Werte, bei denen Paarerzeugung einsetzt: Spontan entstehen dann im Laserstrahl durch quantenelektrodynamische Prozesse Elektronen und ihre Antiteilchen, Positronen, – ein Prozess, der sonst eher in Teilchenbeschleunigern auftritt, aber wohl auch Sekundenbruchteile nach dem Urknall vorkam. Das europäische Extreme Light Infrastructure Project (ELI), geleitet von CPA-Miterfinder Gérard Mourou, soll diese bisher unerreichten Laserintensitäten anpeilen.

Schon vor den ersten Experimenten erwarteten die Forscher, dass energiereiche Kurzpulslaser im Rahmen der Schnellen Zündung in komprimierten Brennstoffkapseln einen Zündfunken produzieren könnten. Genauer analysierten Fusionsphysiker vom LLNL diesen Prozess mit Computersimulationen. Damit konnten sie zeigen, dass relativistische Laserpulse energiereiche Elektronenstrahlen erzeugen, wenn sie auf Festkörper treffen. Solche Strahlen könnten den Zündfunken des Fusionsfeuers in einem komprimierten Brennstoffkügelchen entfachen.

Des Weiteren ergaben diese Simulationen: Die hochenergetischen Laserpulse dringen, sobald sie auf ein nicht allzu dichtes Plasma treffen, durch Kanäle – ähnlich Bohrlöchern – in das Gas ein. Fachleute sprechen denn vom Hole Boring. Diese vergleichsweise tiefen, wenn auch winzigen Löcher helfen dabei, die Energie dort abzuladen, wo sie hin soll, nämlich so genau wie möglich im Zentrum der Brennstoffkügelchen.

Doch sind Simulationen, selbst wenn sie noch so akribisch durchgeführt werden, letztlich nur graue Theorie. In der Physik müssen sie sich immer durch Experimente bestätigen lassen. Waren also die Laserphysiker damit zumindest im Prinzip auf dem richtigen Weg zur Trägheitsfusion? Der erste positive Hinweis in diese Richtung kam aus Japan. Am Institute of Laser Engineering (ILE) in Osaka gelang es einem japanisch-britischen Team um Ryosuke Kodama im Jahr 2000 erstmals, eine lasergetriebene Implosion mit einem Kurzpulslaser zu kombinieren. Wie war ihm das gelungen?

In dem Experiment feuerte Kodama Nanosekunden-Laserpulse aus verschiedenen Richtungen auf eine Kapsel. Danach schoss er einen energiereichen CPA-Pikosekunden-Laserpuls ins Innere der Kapsel, um Elektronen in Richtung des dichten Materials zu beschleunigen – also zum Kugelmittelpunkt hin. In der Apparatur kam auch ein so genannter Zylinderkonus zum Einsatz, der vor dem Experiment so in die Kapsel eingefügt wurde, dass die Spitze des Konus im Zentrum der Kapsel lag. Dieser Konus diente dazu, den Abstand zwischen dem Punkt, an dem der Kurzpulslaser absorbiert wird, und dem dichten Plasma im Kern der Implosion zu verringern, und zwar exakt zum Zeitpunkt maximaler



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK

Wenn Deuterium und Tritium miteinander fusionieren, entstehen ein Heliumatomkern sowie ein schnelles Neutron, das 80 Prozent der Reaktionsenergie mit sich führt.

Wie intensive Laserstrahlen ein Plasma verändern

Ein Elektron, das von einem Laserstrahl niedriger Intensität beschossen wird, schwingt im elektrischen Feld des Laserstrahls senkrecht zu seiner Ausbreitungsrichtung. Für einen Infrarotlaser bei einer Wellenlänge von einem Mikrometer beträgt die Oszillationsperiode, also die Zeit für eine vollständige Auf- und Abbewegung, ungefähr $3 \cdot 10^{-15}$ Sekunden. Wie weit und wie schnell sich das Elektron dabei bewegt, hängt von der Intensität des Lasers ab. Bei hohen Intensitäten, wie sie bei den Kurzpulslasern für die schnelle Zündung gebraucht werden, also etwa 10^{18} Watt pro Quadratzentimeter für einen Infrarotlaser, wird das Elektron dabei beinahe auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt – ganz anders als bei niedrigen Laserintensitäten.

Das Elektron bewegt sich nun entlang der Ausbreitungsrichtung des Lasers. Die Auf- und Abbewegung wird, verglichen mit der Vorwärtsbewegung, zunehmend kleiner. Dieser Effekt rührt daher, dass ein Teilchen nahe der Lichtgeschwindigkeit auf das elektromagnetische Feld des Lasers anders reagiert als ein langsames Teilchen. Das Magnetfeld des Laserstrahls lenkt dann die Bahn des Elektrons nach vorne um.

Dieses einfache Bild der Bewegung eines Einzelteilchens wird aber im Plasma komplizierter. Kollektive Effekte, bei denen viele Elektronen miteinander und mit dem Laserstrahl wechselwirken, beeinflussen die Ausbreitung des Laserstrahls und lösen zugleich Bewegungen des Plasmas durch das elektromagnetische Feld des Lasers aus. Als wichtige Eigenschaft des Plasmas, die sich aus solchen kollektiven Effekten ableitet, kann sich Licht nur unterhalb einer bestimmten Dichte des Plasmas darin ausbreiten. Für Infrarotlicht liegt diese »kritische Dichte« etwa beim 20-Fachen der Dichte von Luft.

Kompression. Die beiden Verfahren unterscheiden sich vor allem darin, dass beim Hole-Boring-Verfahren ein separater Laserpuls benötigt wird, um einen Kanal in das expandierende »Abgasplasma« der Implosion um den dichten Kern zu bohren, bevor der Zündpuls gefeuert werden kann. Mit dem Zylinderkonus als Alternative zum Hole-Boring-Laserpuls gelang trotz der plasmareichen Umgebung der Kapsel, den CPA-Kurzpuls in die Nähe des dichten Kerns vordringen zu lassen, wo die Elektronen beschleunigt werden.

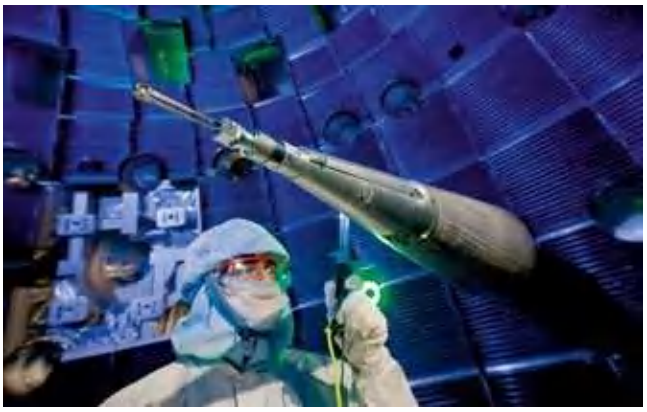
Zwar produzierte das Experiment seinerzeit noch nicht genügend viele Kernreaktionen, um die Kernfusion zu zünden; dazu reichten sowohl die Kompressions- als auch die Heizenergie nicht aus. Dennoch war es für die Fusionsforscher ein großer Erfolg. Zum ersten Mal konnten sie zeigen, dass komprimierter Brennstoff mit Hilfe von laserbeschleunigten Elektronen aufgeheizt werden kann. Auch wurden in dem Versuch weit mehr Neutronen produziert als ohne den Kurzpulslaser. Natürlich verfolgt das ILE-Team dieses Konzept bis heute weiter. Es arbeitet derzeit daran, ihren frühen Erfolg mit einem zehnmal so leistungsstarken Laser zu wiederholen, um noch höhere Dichten und Temperaturen im Plasma zu erreichen.

Die hohe Kunst, Löcher zu bohren

Wie ist der Forschungsstand außerhalb Japans? Gegenwärtig beschäftigen sich weltweit mehrere Labors mit der Kügelchenkompression durch energiereiche Nanosekundenlaser. Sie alle kombinieren diese mit CPA-Laserpulsen, die in der Lage sind, komprimiertes Plasma aufzuheizen. Der energiereichste Kurzpulslaser der Welt steht derzeit am Laboratory for Laser Energetics der Rochester University im US-Bundesstaat New York. Er kann seine intensiven CPA-Strahlen mit einer Energie von 2,6 Kilojoule innerhalb von zehn Pikosekunden abschießen. Zur Kompression der Kügelchen stehen 60 Nanosekunden-Laserstrahlen mit insgesamt 30 Kilojoule zur Verfügung. Mit dieser Kombination unterschiedlicher Lasersysteme ist es der Gruppe in Rochester auf Anhieb gelungen, die Fusionsreaktionen des Osaka-Experiments um ein Vielfaches zu übertreffen – ein viel versprechender Ansatz.

Doch lieferte vor allem die Kunst des Löcherbohrens in der Simulation den entscheidenden Trick, mit dem die Schnelle Zündung arbeitet. Wie kann ein Laserstrahl Löcher in Plasma bohren? Hierbei laufen verschiedene Wechselwirkungen zwischen Laserlicht und Plasma ab. So versetzt einerseits der Laserstrahl das Plasma in Bewegung, und andererseits lenkt das Plasma den Laserstrahl um, ähnlich wie Wasser das Licht. Welche Wirkung eintritt, hängt vom so genannten Strahlungsdruck ab, einem Effekt, den der Physiker James Clerk Maxwell bereits 1873 erkannte. So wie Teilchen, die auf eine Fläche prallen, dort Druck ausüben, kann auch Strahlung mit ihren Photonen auf eine Oberfläche Kraft übertragen.

Der Druck des Laserlichts übersteigt den Plasmadruck schon bei der Energieschwelle von 10^{18} Watt pro Quadratzentimeter. Jenseits dieser »relativistischen« Energie kann ein



LAWRENCE LIVERMORE NATIONAL LABORATORY

UNIVERSITY OF ROCHESTER

Vor jedem Experiment wird das Fusionskügelchen mit einem speziellen Arm innerhalb der Targetkammer exakt positioniert (oben). Sobald die Laser feuern, registrieren viele Messsonden (unten) die Explosion im Detail.

Laserstrahl relativ rasch ein gasförmiges, nicht allzu dichtes Plasma aus der Strahlbahn schieben und wie in einem dünnen Kanal, den es selbst vorantreibt, tiefer in das Medium eindringen – ähnlich wie ein scharfer Wasserstrahl ein Loch in weiche Erde bohrt.

Der Bohrlocheffekt wird bei der Schnellen Zündung dafür genutzt, im Kügelchen einen Kanal durch das Plasma zu treiben, das den Kern mit dem komprimierten Brennstoff umgibt. Dieser Kanal soll den Zündpuls, der schnelle Elektronen für das Erhitzen des Brennstoffes erzeugt, wesentlich näher an das Zentrum bringen und damit die Effizienz verbessern. Die zusätzliche Energie, die das Bohren des Kanals verbraucht, ist jedenfalls geringer als diejenige, die der eigentliche Zündpuls benötigt.

Leider sind der Ausbreitung des Laserlichts im Plasma Grenzen gesetzt. Überschreitet die Plasmadichte nämlich einen kritischen Wert, kann sich ein Laserpuls im Plasma nicht weiter ausbreiten. Stattdessen wird er dann reflektiert oder absorbiert, abhängig von Eigenschaften des Lasers wie Wellenlänge, Intensität, Einstrahlwinkel sowie jenen des Plasmas. Aber genau der Anteil des Lichts, den das Plasma schluckt, beschleunigt die Elektronen und erzeugt einen intensiven

Teilchenstrahl, der mit beinahe Lichtgeschwindigkeit in die gleiche Richtung läuft wie der Laserpuls selbst. An der Plasmaoberfläche, also nahe der kritischen Dichte, bilden sich extrem intensive, quasistatische elektrische und magnetische Felder. Es handelt sich dabei um die stärksten Magnetfelder, die je im Labor gemessen wurden. Sie lassen sich mit denen auf der Oberfläche eines Neutronensterns vergleichen und können ein fast lichtschnelles Elektron über einen Mikrometer hinweg umlenken. Das elektrische Feld auf der Plasmaoberfläche ist eine Million Mal stärker als dasjenige in den stärksten Teilchenbeschleunigern.

Simulationen statt Experimente

Die intensiven kurzen Laserpulse erzeugen Elektronenstrahlen, die nahezu die gesamte Laserenergie enthalten. Diese erhitzen die wenigen Kubikmikrometer Plasma im Laserfokus so heftig, dass es sich innerhalb von Pikosekunden thermisch ausdehnt. Normalerweise könnten die Elektronen mehrere Millimeter dicke Kupferplatten durchschlagen, doch werden sie im komprimierten Brennstoff einer Fusionskapsel mit einer über 100-mal höheren Dichte einfach gestoppt.

Die Kurzpulslaser, die den Brennstoff in zukünftigen Experimenten mit Schneller Zündung aufheizen sollen, werden vermutlich mehr als das 100-Fache Energie pro Puls haben als der derzeit energiereichste Pikosekundenlaser. Das bedeutet, dass Forscher sich vorläufig auf Computermodelle beschränken müssen, um die optimale Konfiguration aus Brennstoffkapseln und Laserpulsen zu ermitteln. Für die Entwicklung und Erforschung der Trägheitsfusion sind Simulationen also von besonderer Bedeutung, solange Experimente die zentralen Fragen noch nicht direkt beantworten können.

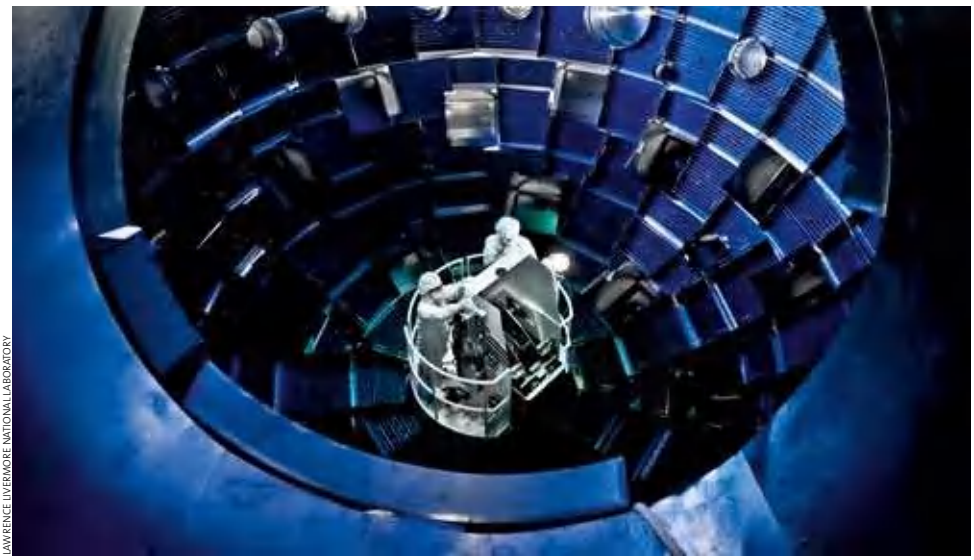
Doch hier haben die Theoretiker gleich ein grundsätzliches Problem: Die üblichen Computermodelle für die Heizphase der Schnellen Zündung sind völlig anders gestrickt und weniger ausgereift als die Modelle auf Basis der Hydrodynamik, wie sie schon seit Jahren an der NIF verwendet werden. Letztere reduzieren, ähnlich den Modellen für Klima- und Wettervorhersagen, das komplizierte Verhalten des Plasmas auf wenige makroskopische Variablen – wie Dichte, Temperatur und Geschwindigkeit – und berechnen ihre gegenseitige Abhängigkeit mit Hilfe physikalischer Grundgleichungen.

Verglichen mit den etablierten Hydrodynamiksimulationen für die Kompression von Fusionskapseln ist die Forschung an der Heizphysik für die Schnelle Zündung noch relativ jung. Die extremen elektromagnetischen Felder in intensiven kurzen Laserpulsen beeinflussen das Plasma derart, dass sich mikroskopische Effekte, die von makroskopischen Variablen wie der Temperatur nicht erfasst werden, nicht mehr vernachlässigen lassen. Daher sind Hydrodynamikmodelle für die Kurzpulswechselwirkung nicht anwendbar. Stattdessen verwenden Forscher die hier so genannte Particle-in-Cell(PIC)-Simulationen. Bei diesen wandern Millionen positiv und negativ geladener Teilchen durch ein virtuelles räumliches Gitter von Zellen, auf denen alle elektromagnetischen Felder definiert sind. Die Bewegungen von Teilchen und Feldern beeinflussen sich dabei laufend gegenseitig: Einerseits werden Teilchen von benachbarten Feldern abgelenkt, andererseits werden Letztere von elektrischen Strömen auf Grund der Teilchenbewegung verändert. Um die Entwicklung des Plasmas zu verfolgen, wiederholt der Computer diesen Zyklus laufend in – simulierten – Bruchteilen einer Femtosekunde (10^{-15} Sekunden).

Das PIC-Verfahren wurden in den 1960er Jahren entwickelt, um mittels Computer kollektive Plasmaeffekte in idealisierten Fällen zu untersuchen, bei denen viele Elektronen miteinander und mit dem Laserstrahl wechselwirken. Später fügten die Forscher zwar auch die komplexeren kollektiven Laser-Plasma-Wechselwirkungen für Nanosekundenpulse hinzu, aber aus Mangel an Rechnerleistung noch immer an

LAWRENCE LIVERMORE NATIONAL LABORATORY

Eine von zwei Laserhallen der National Ignition Facility am Lawrence Livermore National Laboratory in Kalifornien: Jede der beiden Hälften links und rechts des Wartungsflurs in der Mitte enthält exakt 48 Strahlrohre. Bei einem Schuss verteilt sich ein Saatpuls auf 192 nahezu identische Pulse, die simultan verstärkt werden und dann gleichzeitig zum Target gelangen.



LAWRENCE LIVERMORE NATIONAL LABORATORY

Im Zentrum der Targetkammer der National Ignition Facility: Mit einer Hebebühne inspizieren und warten Techniker das Innere der Anlage.

vereinfachten Modellen. Diese Situation verbesserte sich wesentlich, als in den 1990er Jahren die ersten Kurzpulslaser aufkamen. Inzwischen sind PIC-Simulationen zu einem wichtigen wissenschaftlichen Werkzeug geworden, das die extrem schwierigen Kurzpulslaserexperimente unterstützt.

Die relativ einfachen Algorithmen von PIC-Modellen, die leicht auf Parallelrechnern installiert werden können, aber große Mengen an Speicher benötigen, machen sie zu idealen Anwendungen, weshalb die Plasma-Teilchen-Simulationen Hand in Hand mit der Entwicklung von Supercomputern vorangeschritten sind. Einige der ersten großen Computerberechnungen relativistischer Laser-Plasma-Wechselwirkungen entstanden Mitte der 1990er Jahre, unter anderem am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching. Die Wissenschaftler konnten dazu erstmals einen Cray-T3E-Rechner mit 700 Prozessoren einsetzen, um bis zu einer Milliarde Teilchen zu simulieren.

Seitdem hat sich die Leistung von Supercomputern verhundertfacht, sowohl was Geschwindigkeit als auch Speicherplatz betrifft. Die größte bislang veröffentlichte Teilchensimulation von Laser-Plasma-Wechselwirkungen betrachtete etwa eine Billion, also 10^{12} Teilchen, was einem Speicherplatz von einem Petabyte (einer Million Gigabyte) entspricht. Diese Simulation gelang Forschern um Ken Bowers vom Los Alamos National Laboratory 2008 auf dem Supercomputer »Roadrunner« in Los Alamos – der ersten Rechenmaschine, die pro Sekunde 10^{15} Operationen durchführen konnte.

Aber auch für die größten heutigen Supercomputer ist eine Simulation der intensiven Laser-Plasma-Wechselwirkung für ein Experiment mit Schneller Zündung im 1:1-Maßstab, also mit dem gesamten Plasmavolumen, eine extreme Herausforderung. Der Grund liegt in der enormen Anzahl von Teilchen, die dafür benötigt wird: Der komprimierte Kern einer Kapsel für die Schnelle Zündung zum Beispiel enthält etwa 10^{21} Elektronen in einem Volumen, das einer Kugel mit einem Radius von etwa einem zehntel Millimeter entspricht. Allein die Positionen all dieser Teilchen zu registrieren, würde die Speicherkapazität selbst des größten Rechners sprengen.

Wenn Forscher an ihre Grenzen stoßen, werden sie zumeist erfindungsreich. Anstatt also das Simulationsproblem der Trägheitsfusion direkt zu lösen, zerlegen sie es in drei Schritte, die zeitlich dicht aufeinander folgen und sich zum Glück mit jeweils anderen Methoden behandeln lassen:

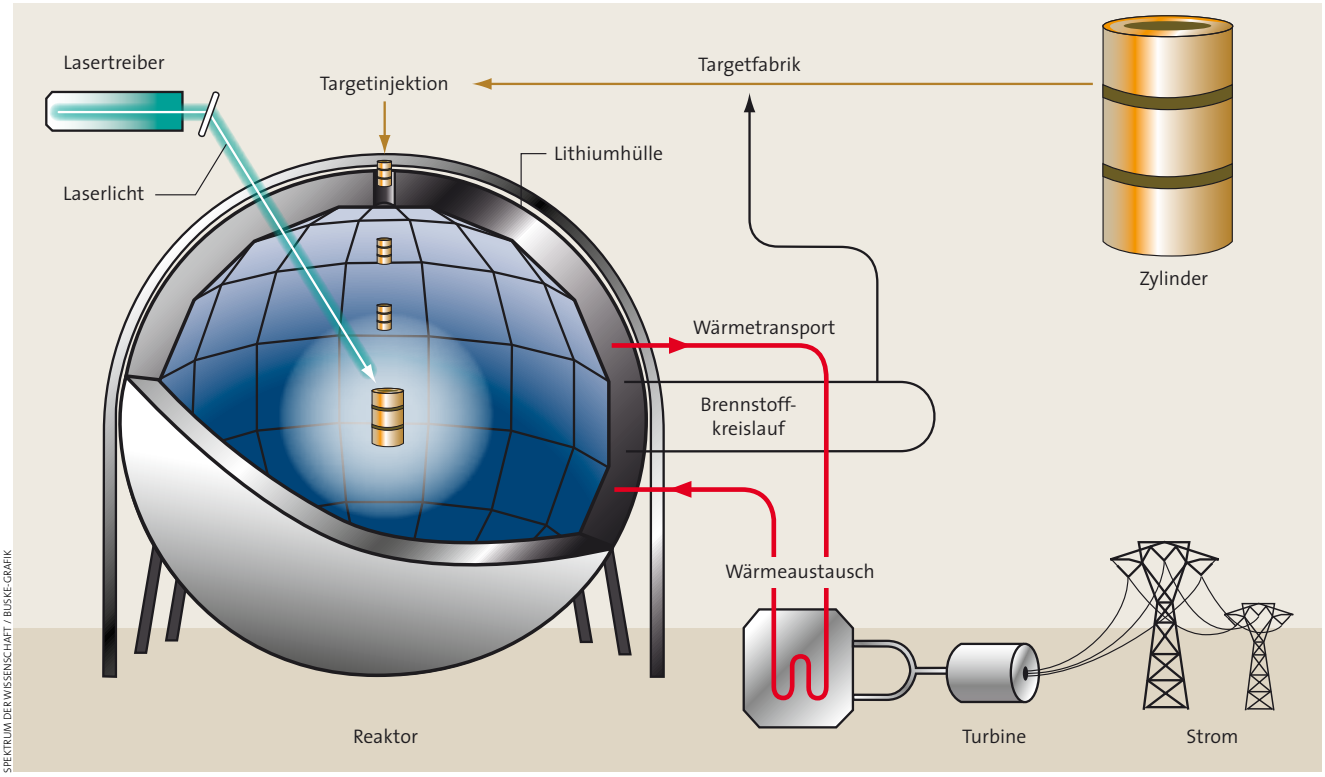
- die Kompressionsphase mit etwa 30 Nanosekunden;
- die Kurzpulswechselwirkung mit etwa 10 Pikosekunden;
- der Transport von relativistischen Elektronen zum dichten Kern des komprimierten Brennstoffes; Dauer rund 50 Pikosekunden.

Doch der Reihe nach: Die vergleichsweise lange Kompressionsphase der Brennstoffkügelchen wird mit hydrodynamischen Simulationen ähnlich wie in der Standardträgheitsfusion behandelt.

Eng gebündelte Elektronenstrahlen

Was passiert nun genau im Kern einer solchen Fusionskapsel im Verlauf der zehn Pikosekunden, während der ihr Zentrum maximal komprimiert und zugleich der Kurzpulslaser gefeuert wird? Um diese Vorgänge zu berechnen, kombinieren Forscher die Simulation der Teilchen mit einem separaten Computermodell des vom Laser verursachten Elektronenstrahls, der sich seinen Weg durchs Plasma in Richtung Kugelmitte bahnt. Die Zone, die der Laser direkt beeinflusst, erstreckt sich zwar über Hunderte von Mikrometern – für diese Prozesse eine große Distanz. Aber die vergleichsweise geringe Plasmadichte reduziert dort die Anforderungen an die Teilchensimulationen.

Je mehr sich allerdings der Elektronenstrahl dem Zentrum nähert, desto mehr gelangt er in Schichten höherer Plasmadichte. Dafür brauchen Theoretiker Modelle, welche die Eigenschaften verschiedener Ansätze kombinieren: Während der Elektronenstrahl selbst durch Teilchen auf einem virtuellen Gitter beschrieben wird (in einer Art Fortsetzung des Particle-in-Cell-Verfahrens), lässt sich das dichte Plasma



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK

Ein Reaktor würde mittels Laserbombardement zehnmal pro Sekunde ein Target implodieren lassen. Die frei werdenden Neutronen erhitzen dann die Reaktorwand aus Lithium.

durch ein hydrodynamisches Modell darstellen. Dieses charakterisiert das Plasmaverhalten durch einige makroskopische Parameter – wie Druck, Dichte und Temperatur –, ähnlich wie in konventionellen Programmen zur Hydrodynamik. Solche Hybridmodelle sind Gegenstand aktueller Forschung.

Eine der größten Herausforderungen für Schnelle Zündung liegt aber in der Steuerung des lasererzeugten Elektronenstrahls. Teilchensimulationen sagen bisher voraus, dass dieser sich wie ein Fächer öffnet, anstatt geradewegs und gebündelt bis zum Kern durchzudringen. Das nicht erwünschte Verhalten des Elektronenstrahls hängt eng damit zusammen, wie der Laserstrahl vom Plasma absorbiert wird. Das lässt sich jedoch nicht einfach kontrollieren, beispielsweise durch eine raffiniertere Laseroptik oder spezielle Plasmakonfigurationen. Denn der energiereiche Laserstrahl modifiziert die Plasmaoberfläche selbst so sehr, dass er jede vorgegebene Anordnung rasch verändert.

Je mehr sich aber der Elektronenstrahl bei seinem Eindringen ins dichte Plasma aufspreizt, desto weniger kann er es im Kern des Brennstoffkügelchens aufheizen, wo die Fusionsreaktionen starten sollen; denn ein großer Teil des Strahls verfehlt dann schlicht den Kern, und seine Energie wird eher im Plasma abgegeben, das den Kern umgibt. Die Physiker möchten dieses Problem wie folgt lösen: Sie wollen im Plasma Magnetfelder erzeugen, welche die Elektronen wieder näher zum Zentrum der Kapsel lenken, um der Strahlspreizung entgegenzuwirken und den Strahl wieder zu fokussieren. Es gibt bereits Entwürfe, wie der Elektronstrahl selbst solche Magnetfelder im Plasma erzeugen könnte: Die Brennstoffkapseln sollen dazu noch vor der Kompressionsphase aus Schichten verschiedener Materialien zusammengesetzt werden. Ob diese Idee Erfolg hat, müssen die Experimente noch zeigen.

Die Schnelle Zündung galt lange als Königsweg zur Energiequelle Trägheitsfusion. Sie hat im Lauf der letzten 20 Jahre aber nicht nur das Interesse an Trägheitsfusion zur Energiegewinnung angefacht, sondern auch die Entwicklung von energiereichen Kurzpulslasern beschleunigt und – auf dem Gebiet der Laser-Plasma-Wechselwirkungen – zu ganz unvorhergesehenen Anwendungen geführt.

So gelang es im Jahr 2000 einer Gruppe von Wissenschaftlern des LLNL, in der Wechselwirkung mit einem energiereichen Kurzpulslaser einen relativ fokussierten und hochenergetischen Protonenstrahl zu erzeugen. Dies könnte eine Alternative für Teilchenbeschleuniger der nächsten Generation eröffnen, aber auch neue Möglichkeiten in der Krebsmedizin. Die Livermore-Physiker setzten dazu den NOVA-Petawatt-Laser ihres Instituts ein, mit dem sie hauchdünne Metallfolien beschossen. In Teilchensimulationen hatten sie bereits vorhergesagt, dass die Protonen aus der nur tausendstel Millimeter dicken Metallschicht von elektrischen Feldern auf der Rückseite der Folie beschleunigt werden.

Diese Felder, millionenfach stärker als etwa die von großen Teilchenbeschleunigern, entstehen, wenn das Laserlicht an der Folienvorderseite absorbiert wird und energiereiche Elektronen aus dem Material herausschlägt. Die fast lichtschnellen, geladenen Partikel erzeugen dann die hohen elek-

trischen Feldstärken. Sie sind so stark, dass sie innerhalb von Pikosekunden auch schwerere geladene Teilchen aus der Metallschicht ablösen, hauptsächlich eben Protonen und sogar die noch schwereren Kohlenstoffionen, und sie gleichfalls auf hohe Geschwindigkeiten beschleunigen. Diese Entdeckung mit ihren potenziellen Anwendungen in bildgebenden Verfahren und in der Tumorbekämpfung sorgte weltweit für Aufregung und fand bereits zahlreiche Nachahmer. Da Kurzpulslaser inzwischen relativ kostengünstig verfügbar und auch genügend kompakt sind, könnten sie eines Tages teure und große Teilchenbeschleuniger ersetzen.

Doch zurück zur Trägheitsfusion. Die Physiker werden die Konfiguration aus Laserpuls, Hohlraum und Brennstoffkapsel weiter optimieren müssen, um das Verhältnis von Fusionsenergie zu investierter Laserenergie zu steigern. Nur dann hat die kommerzielle Nutzung der Trägheitsfusion in einem Reaktor überhaupt eine Perspektive. Das Konzept der Schnellen Zündung wird dazu sicherlich beitragen.

Eine Million Brennstoffkapseln pro Tag

Wie könnte ein solcher Fusionsreaktor aussehen? Sein Inneres unterscheidet sich in mehrerer Hinsicht von der NIF. Die Wände der Reaktorkammer zum Beispiel müssen eine rasche Folge von Mikroexplosionen und das Bombardement mit Neutronen aushalten, die bei der Kernverschmelzung freigesetzt werden. Diese Partikel enthalten den Großteil der gesamten Fusionsenergie. Sie dringen ungehindert aus dem explodierenden Kügelchen bis in die Wand der Targetkammer, werden dort abgebremst und setzen so Wärme frei. In der Behälterwand kreist eine Kühlflüssigkeit aus flüssigem Lithium, die die Energie der Neutronen aufnimmt und sich erhitzt. Über einen Wärmetauscher wird schließlich Wasserdampf erzeugt, der über eine Turbine Elektrizität generiert.

Zusätzlich hat die Reaktorkammer auch noch die Aufgabe, neuen Brennstoff für die Kügelchen zu erbrüten: Während Deuterium und Lithium in den Weltmeeren in genügenden Mengen vorrätig sind, muss das radioaktive, in der Natur kaum vorkommende Tritium künstlich erzeugt werden. Aus dem Lithium der Kühlflüssigkeit entstehen beim Neutronenbeschuss Tritium und Helium. Eine ähnliche Technologie zur Tritiumherstellung soll auch in Magnetfusionsreaktoren verwendet werden.

Die größte Herausforderung für ein Laserfusionsreaktorkonzept stellt aber die hohe Wiederholungsrate von Implosionen dar, die für eine kommerzielle Nutzung erforderlich wäre. Eine LLNL-Studie namens Laser Inertial Fusion Energy, kurz LIFE, geht davon aus, dass pro Sekunde bis zu zehn Brennstoffkapseln mit hoher Geschwindigkeit in das Reaktorgefäß eingeschossen werden – das Minimum, um aus einem Reaktor eine Leistung von 2500 Megawatt herauszuholen.

Pro Tag müssen demnach etwa eine Million Brennstoffkapseln hergestellt und auf den Millimeter genau in die Mitte der Targetkammer platziert werden. Wegen der hohen Schussrate würde das LIFE-Lasersystem nicht mehr von Blitzlichtlampen gepumpt werden können, wie es beim jetzigen Laser an der NIF der Fall ist, sondern mit Festkörperlaserdioden. Diese zeigen eine hohe Energieffizienz und werden bereits seit etwa 20 Jahren in Industrie und Wissenschaft eingesetzt. Noch sind sie zwar relativ teuer, aber diesen Kosten könnten, so wie jene anderer Halbleiter auch, in nächster Zeit deutlich fallen.

Ähnlich wie bei der heutigen NIF-Anlage würde auch das LIFE-Lasersystem mit 192 Strahlen betrieben werden – oder vielleicht auch mit doppelt so vielen. Aber weil ihre Energiedichte viel höher liegt als die von Blitzlichtlampen, genügen zehn Meter Länge für die notwendige Verstärkung der Laserstrahlen an Stelle der 100 Meter langen Strecke der NIF.

Die relativ kompakten Lasermodule brächten große Vorteile für die Bedienmannschaft: Einzelne Module könnten ausgetauscht werden, ohne den Reaktor abzuschalten. Des Weiteren soll die Targetkammer in regelmäßigen Abständen ausgetauscht werden, was den Vorzug hat, dass ihre Wände nicht aus speziellen Materialien bestehen müssten, die dem dauernden Beschuss mit Neutronen über die gesamte Lebensdauer eines Kraftwerks, also mehrere Jahrzehnte, standhalten. Solche Legierungen gibt es derzeit noch nicht, sie müssten erst entwickelt werden.

Deshalb ist nach dem LIFE-Konzept für die Targetkammer konventioneller Stahl vorgesehen. Alle zwei Jahre, wenn der Stahl durch Neutronenbeschuss geschwächt ist, würde demnach die Kammer ausgetauscht. Sie würde dann Monate später, sobald die Radioaktivität hinreichend abgeklungen wäre, zerlegt und entsorgt. Die LIFE-Studie hat den Vorzug, durchweg auf heute verfügbare Technologien zu setzen. Das nutzen die Reaktoringenieure, um für den Bau mit einem ehrgeizigen Zeitplan aufzuwarten. Mike Dunne, der das LIFE-Projekt leitet, schätzt, dass ein Pilotkraftwerk nur zwölf Jahre nach dem Zeitpunkt betriebsbereit sein könnte, an dem mit der NIF die erste Zündung der Trägheitsfusion erreicht wurde. ~

DER AUTOR

Andreas J. Kemp studierte theoretische Physik an der Technischen Universität München und dem Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching. Er arbeitet derzeit im Fusion Energy Sciences Program am Lawrence Livermore National Laboratory in Kalifornien an Computersimulationen von Laser-Plasma-Wechselwirkung für Fast-Ignition und andere Anwendungen.

QUELLEN

Atzeni, S., Meyer-ter-Vehn, J.: The Physics of Inertial Fusion. Oxford University Press, 2004

Clery, D.: Fusion Power's Road Not Yet Taken. In: Science 334, S. 445–448, 2011

WEBLINK

Den vollständigen Artikel und weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1152346**

Von wegen 3-D!

Ein verdunkeltes Auge genügt, damit unser visuelles System zweidimensionale Bilder als räumlich wahrnimmt.

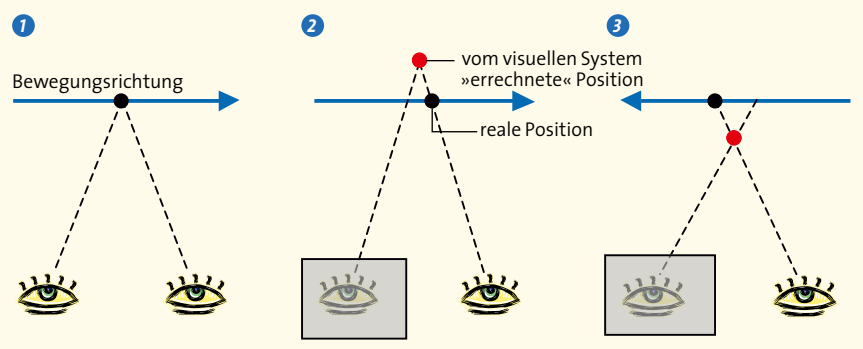
VON H. JOACHIM SCHLICHTING

> Unsere Sinne hintergehen fortwährend den Verstand.
>
> *Michel de Montaigne (1533–1592)*

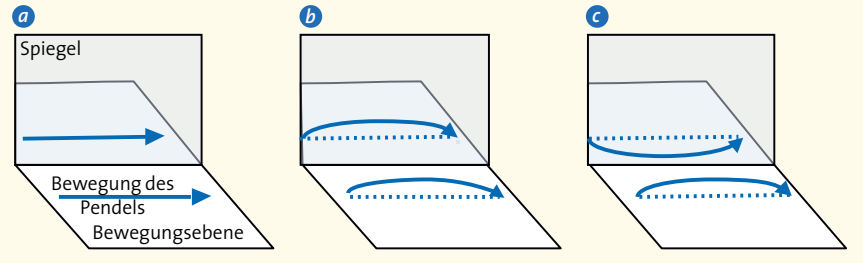
Wird abends in den Städten die Straßenbeleuchtung eingeschaltet, scheint eine Lampe nach der anderen aufzuflammen – wie ein Lauffeuer breitet sich das Licht entlang den Straßen aus. Doch warum? Schließlich braucht das Licht von Lampe zu Lampe über den Daumen gepeilt gerade einmal eine millionstel Sekunde. Viel zu wenig, als dass unser visuelles System irgendwelche Unterschiede feststellen könnte.

Liegt es vielleicht an der langen Kupferleitung, die der Strom passieren muss? Elektronen bewegen sich in Leitern tatsächlich nur mit Geschwindigkeiten von typischerweise Zehntelmillimetern pro Sekunde. Doch entscheidend ist, wie schnell die Energie in die Lampe übertragen wird – und das geschieht eben doch mit Lichtgeschwindigkeit.

Das Phänomen hat wohl eher etwas mit der langen Leitung unserer eigenen Wahrnehmung zu tun. Das visuelle System reagiert auf einen schwachen Lichtreiz bis zu eine zehntel Sekunde später als auf einen starken. Bei zwei unterschiedlich intensiven Lichtsignalen zur selben Zeit sehen wir das schwächere Signal deshalb verzögert, weil es – nach überwiegender Ansicht der Fachwelt – in unserem visuellen System langsamer übertragen wird als ein stärkeres Signal. Diese Verzögerung, der so genannte »visual delay«, ist dabei umso stärker, je schwächer das Licht ist.



Bewegt sich ein von uns betrachtetes Objekt von links nach rechts (1), erscheint es in Folge des Pulfrich-Effekts bei verdunkeltem linkem Auge ferner (2), als es in der Realität ist. Bei umgekehrter Richtung erscheint es hingegen näher (3).



ABBILDUNGEN DIESER DOPPELSEITE: H.-J. SCHLICHTING

Mit einem Spiegel lässt sich die 3-D-Illusion entlarven. Die blaue Linie symbolisiert die Bahn, die eine pendelnde Kugel zurücklegt. Deren Auf-und-ab-Bewegung ist hier vernachlässigt. Haben beide Augen freie Sicht, ergibt sich Situation (a). Bei verdunkeltem linkem Auge tritt der Pulfrich-Effekt auf. Dann erscheinen, wie in (b) gezeigt, das reale wie das gespiegelte Objekt weiter entfernt. Würde die Kugel tatsächlich eine elliptische Bahn durchlaufen, sähe man mit zwei freien Augen Situation (c).

Gehen wir davon aus, dass die Lampen in einer Straße identisch sind und praktisch zur selben Zeit aufleuchten. Da von einer Lampe umso weniger Licht in unsere Augen gelangt, je weiter sie von uns entfernt ist, nehmen wir ihr Aufleuchten also entsprechend später wahr – die reale Gleichzeitigkeit wird zu einem subjektiven Nacheinander. Noch interessanter wird diese optische Täuschung, wenn sie uns eine zweidimensionale Bewegung räumlich wahrnehmen lässt – ein Effekt, den der deutsche Physiker Carl Pulfrich (1858–1927) im Jahr 1922 entdeckt hat.

Obwohl er auf dem linken Auge blind war und seine Entdeckungen nie selbst überprüfen konnte, setzte sich Pulfrich in zahlreichen Publikationen mit dem räumlichen Sehen auseinander. Es wird dadurch möglich, dass jedes Auge einen Gegenstand aus einem anderen Winkel sieht. Diesen Unterschied nutzt unser visuelles System, um aus ihm die Entfernung der Gegenstände im Sichtfeld zu »errechnen«. Es weist also jedem der Objekte einen Abstand zu, und der Betrachter gewinnt einen räumlichen Eindruck der Situation.

Ein in 2-D gefilmtes Kettenkarussell in voller Bewegung ist ideal, um mit Hilfe des Pulfrich-Effekts und eines abgedunkelten Auges einen 3-D-Eindruck hervorzurufen.

Wir können unser Gehirn aber vorsätzlich täuschen, wenn wir vor das linke Auge ein verdunkelndes Glas halten, während das rechte weiterhin freie Sicht hat. Richten wir den Blick nun auf einen Gegenstand, der sich von links nach rechts bewegt (Grafik links, 1). Das verdunkelte linke Auge reicht wegen des »visual delay« ein Bild ans Gehirn weiter, das den Gegenstand zu einem früheren Zeitpunkt auf seiner Bahn zeigt als das Bild vom rechten Auge. Der dazwischenliegende Winkel enthält nun nicht nur eine räumliche, sondern zusätzlich auch eine zeitliche Information.

Das visuelle System verrechnet sich

Von letzterer »weiß« das visuelle System aber nichts und errechnet daher eine falsche Entfernung: Der Gegenstand erscheint weiter entfernt, als er es tatsächlich ist (2). Bewegt er sich in umgekehrter Richtung, erscheint er hingegen näher (3).

An einem einfachen Fadenpendel lässt sich dies wunderbar demonstrieren. Lassen wir es senkrecht zur Blickrichtung in einer Ebene hin- und herschwingen und verdunkeln dann das linke Auge. Während die Kugel nach rechts schwingt, erscheint sie weiter vom Betrachter entfernt; wenn sie sich nach links bewegt, scheint sie hingegen näher zu sein. Dabei verändert sich ihr scheinbarer Abstand kontinuierlich, denn die virtuelle Verschiebung ist umso größer, je schneller sich die Kugel bewegt. Und da die Kugel auf ihrem Weg vom tiefsten Punkt (in dem sie ihre größte Geschwindigkeit besitzt) zum Umkehrpunkt hin (in dem sie einen Moment lang völlig zur Ruhe kommt) immer langsamer und in der Rückschwingung wieder immer schneller wird, gewinnt der Betrachter den Eindruck, die Kugel würde eine geschlossene Kurvenbahn durchlaufen.

Die 3-D-Illusion lässt sich allerdings entlarven. Dazu positioniert man das Pendel vor einem senkrecht aufgestellten Spiegel. Sind beide Augen frei, sieht man die in der Grafik links unten skizzierte Bewegung (a). Die Auf-und-ab-Bewegung des Pendels haben wir dabei vernachlässigt. Verdunkelt man hingegen das linke Auge, sieht man die in b dargestellte Bewegungsfigur. Normalerweise würde ein Spiegelbild »vorne« und »hinten« vertauschen (c); hier aber geschieht dies nicht – ein klarer Hinweis auf den Pulfrich-Effekt. Denn die reale Bewegung verläuft ebenso wie die virtuelle im Spiegel genau in der Schwingungsebene des Pendels. Und auf beide wirkt der Verzögerungseffekt gleich, sorgt also für dieselbe vermeintliche Bahnkrümmung.

Die Anordnung trickst demnach die eine optische Täuschung, nämlich die nur vorgegaukelte Spiegelwelt, mit der anderen, dem Pulfrich-Effekt, aus. Sie bringt zu Wege, was wir von einem ordentlichen Spiegel zumindest unbewusst stets erwarten, so unmöglich das auch immer sein mag: dass er rechts und links eben nicht vertauscht, dass er uns eine Spiegelung ohne Spiegelverkehrung liefert.

Mittlerweile wurde der Pulfrich-Effekt sogar schon in Fernsehsendungen eingesetzt; schließlich benötigt er weder besondere Kameras noch spezielle Projektoren oder Bildschirme. Damit er jedoch gut funktioniert, müssen sich die Objekte möglichst schnell und außerdem nur in eine Richtung bewegen. »Echten« 3-D-Filmen macht er darum keine Konkurrenz. ~

DER AUTOR

H. Joachim Schlichting war bis 2011 Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. 2008 erhielt er für seine didaktischen Konzepte den Pohl-Preis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.

QUELLEN

Pulfrich, C.: Die Stereoskopie im Dienste der isochromen und heterochromen Photometrie. In: Die Naturwissenschaften 10, S. 553–564, S. 569–574, S. 596–601, S. 714–722, S. 735–743, S. 751–761, 1922

Wilson, J. A., Anstis, S. M.: Visual Delay as a Function of Luminance. In: The American Journal of Psychology 82, S. 350–358, 1969

WEBLINK

Das Videoportal YouTube hält viele Filmbeispiele bereit. Auf **www.spektrum.de/artikel/1152347** haben wir einige für Sie zusammengestellt.

MERKWÜRDIGES UND SCHERZHAFTES

Spiele mit Dimensionen

Aus den beiden Bedeutungen des Wortes »Dimension« – Anzahl der unabhängig voneinander wählbaren Koordinaten für einen Punkt einerseits, Bereich von Größenordnungen andererseits – und deren Zusammenhang ergibt sich Überraschendes über Milliarden von Erbsen und Menschen, einen Ölfleck und die Energieproduktion der Sonne.

VON NORBERT TREITZ

Vor wenigen Monaten hat die Anzahl der Menschen auf der Erde den Wert von sieben Milliarden überschritten. Kann man sich so eine (immerhin »natürliche«) Zahl irgendwie vorstellen?

Hoch entwickelte Säugetiere und Vögel können nicht zu große einstellige Zahlen auf einen Blick erfassen (Spektrum der Wissenschaft 6/2012, S. 12). Aber stellen Sie sich vor, Ihnen würde eine Auswahl von Haufen präsentiert. Einer enthält sieben Milliarden Erbsen, andere vielleicht die halbe, die doppelte, die vierfache Menge oder auch nur ein Viertel davon. Könnten Sie mit bloßem Auge und ein paar geschickten Überschlagsrechnungen den mit den sieben Milliarden herausfinden?

Wie sich herausstellt, kommt es entscheidend darauf an, in wie vielen Dimensionen man die Erbsen sortiert. Antike Philosophen grübelten über ein Paradoxon (»Sorites«), für das sie keine gute Auflösung fanden: Ab welcher natürlichen Zahl n bilden n Körner einen Haufen? Mein ehemaliger Duisburger Kollege Herbert Litschke, der inzwischen Professor in Wismar ist, schlug spaßeshalber folgende Lösung vor: Ab drei Dimensionen ist es ein Haufen. Möglicherweise kann man das ernster nehmen, als er es zunächst gemeint hat.

Ein kettenförmiger, also eindimensionaler Haufen von sieben Milliarden Erbsen der Dicke 5 Millimeter ist 35 000 Kilometer lang. Das sind 7/8 des Erdumfangs. Der Erde würde also die Erbsenkette dort, wo sie am dicksten ist, nicht passen, aber immerhin auf knapp 29 Grad nördlicher oder südlicher Breite. Das hört sich recht handfest an, doch welche unmittelbaren Sinneserfahrungen haben wir mit dem Erdumfang? Von alters her geben wir große Wege als Reisezeiten an. Zu Fuß, per Reittier oder Fahrrad sind diese Zeiten Gegenstand unmittelbarer Sinneserfahrung, mit Auto, Bahn oder Flugzeug dagegen weniger. Nehmen wir 20 Kilometer pro Stunde für mäßig schnelles Radfahren. Der Erdumfang »dauert« dann 2000 Stunden oder etwas mehr als 83 Tage, nur geringfügig länger, als Jules Vernes Romanfigur Phileas Fogg unter Aufbietung der technischen Möglichkeiten seiner Zeit benötigte (Spektrum der Wissenschaft 8/2011, S. 50). Ein Radfahrer, der Tag und Nacht durchstrampelt, hat nach knapp zweieinhalb Monaten das Ende der Erbsenkette erreicht. Das gibt ihm eine gewisse Vorstellung von der Zahl 7 Milliarden. Na ja.

Wie wäre es stattdessen in zwei Dimensionen? Wir kippen die Erbsen auf einen quadratischen Fußboden. Der muss dann 418 Meter Kantenlänge haben. Ein Platz dieser Größe wäre gut zu überblicken.

In drei Dimensionen wird es noch kompakter: Unsere sieben Milliarden Erbsen passen in einen Würfel von knapp zehn Meter Kantenlänge – selbst dann, wenn wir uns jede Erbse in ein würfelförmiges Kästchen verpackt denken. Das ist nun erst recht gut überschaubar. Dass sich die Kugelpackung, in der Ebene wie im Raum, noch etwas optimieren lässt, ist diesmal ausnahmsweise nicht mein Thema.

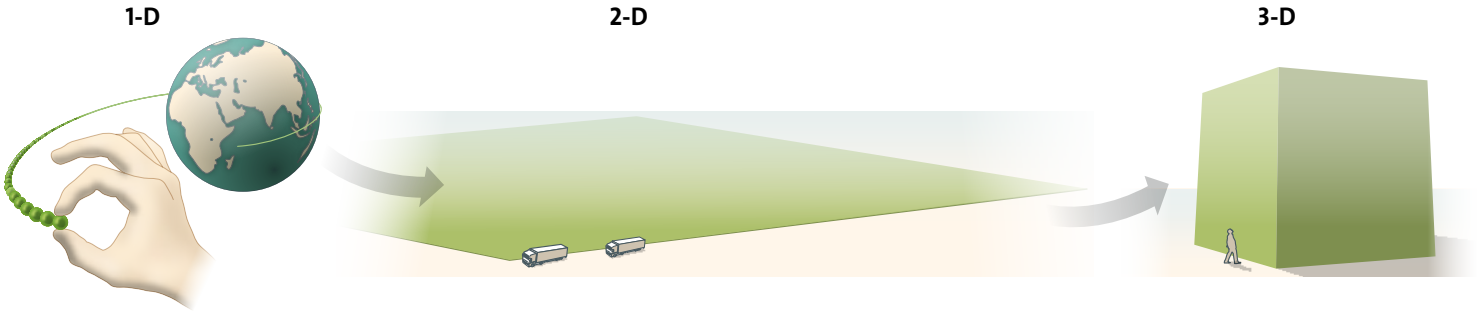
Je größer die Zahl der Dimensionen, desto handlicher wird die Erbsenpackung. In zehn Dimensionen hätte der Würfel, der unsere sieben Milliarden Erbsen fasst, nur noch wenige Zentimeter Kantenlänge (Kasten unten). Dabei unterstellen wir, dass eine Erbse in jeder Dimension so weit ausgedehnt ist wie in den dreien, in denen wir leben. Zu ärgerlich, dass wir aus Mangel an Vorstellungsvermögen diese hochdimensionalen Räume nicht zur Erbsenzählerei nutzen können.

Thermische Ausdehnung

Zu den physikalischen Bagatelleffekten, die in der Schule – wegen durchaus interessanter Anwendungen – ungemein wichtig genommen werden, ge-

Wie viele Erbsen passen in einen hochdimensionalen Würfel?

Ein *n*-dimensionaler Würfel der Kantenlänge *L*, gemessen in Erbsendicken, fasst L^n Erbsen, säuberlich im kubischen Gitter aufgereiht. (In einer optimalen Kugelpackung sind es noch weit mehr.) Für eine gegebene Anzahl N von Erbsen (zum Beispiel $N = 7 \cdot 10^9$) berechnet sich die erforderliche Kantenlänge aus der Gleichung $L^n = N$ zu $L = \sqrt[n]{N}$. Durch Logarithmieren ergibt sich $\lg L = \lg N/n = 9{,}845/n$ (Zehnerlogarithmen). Ab $n = 10$ ist $\lg L$ kleiner als 1 und damit L kleiner als 10. Dann passen so viele Erbsen, wie es Menschen gibt, in einen Würfel, dessen Kante nur knapp zehn Erbsenlängen misst.



ILLUSTRATIONEN DES ARTIKELS: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK

hört die thermische Ausdehnung. Angenommen, ein Material wird durch Erwärmung um, sagen wir, 20 Grad je ein Promille länger, dicker und breiter. Das ist sehr viel, aber bequem und anschaulich zu rechnen. Um wie viele Promille vergrößert sich dabei der Innenraum einer Flasche? Oder wird er gar kleiner, weil die Wände ja dicker werden?

Wir stellen uns die Flasche aus Glaswürfeln aufgebaut vor und den Innenraum aus ebenso großen Luftwürfeln. Werden nun diese Würfel in jeder der drei Dimensionen um den Faktor $(1+x)$ größer, so wachsen auch alle Wandlängen, -breiten und -dicken um diesen Faktor, alle Volumina also um den Faktor $(1+x)^3$ oder $1+3x+3x^2+x^3$, wie sich durch Ausmultiplizieren nach der binomischen Formel ergibt.

Nun beginnt eine Näherungsrechnung: x sei »klein gegen 1«. Damit ist gemeint, dass der Unterschied von 1 und $1+x$ gerade noch von Bedeutung ist, der zwischen 1 und $1+x^2$ oder dem Entsprechenden mit noch höheren Potenzen aber als unwesentlich vernachlässigt werden soll. $x = 1$ Promille ist ein typisches Beispiel: Auf ein Tausendstel kommt es noch an, auf ein Millionstel oder gar Milliardstel aber nicht mehr.

Die obige Formel sagt uns nun, dass die eindimensionale Änderung um ein Promille eine dreidimensionale um »wenig mehr als« drei Promille nach sich zieht. In der Formelsammlung liest sich das dann kurz und treffend so: Der kubische Ausdehnungskoeffizient ist rund dreimal so groß wie der lineare.

Eine Verdopplung aller Längen, Breiten und Dicken bringt dagegen eine Verachtfachung des Volumens, also einen Zuwachs um 7000 Promille: x ist dann nicht 0,001, sondern 1. Die binomische Formel gilt immer noch, aber nicht die Bedingung, dass x klein gegen 1 sein soll.

Zeichnet man den Würfel mit und ohne Vergrößerung, so sieht man ohne Weiteres, welche Quader man wann vernachlässigen kann und welche nicht. Das Quecksilber steigt also bei Erwärmung im Thermometer, obwohl dessen Hohlraum größer wird, und dem wäre nicht so, wenn es sich nicht stärker ausdehnen würde als das Glas.

Wenn Ihnen das Ganze auch schon vor diesen Erklärungen trivial erschien, fragen Sie einmal Ihre Bekannten – und seien Sie nicht zu sehr enttäuscht.

Sieben Milliarden Erbsen werden erst dann einigermaßen übersichtlich, wenn man sie dreidimensional verpackt.

Der Ölfleckversuch

Lassen wir nun in Gedanken die Erbsen auf Atomgröße schrumpfen, so dass wir mit bloßem Auge ihre Größe nicht mehr erkennen, geschweige denn sie zählen können. Durch ein geschicktes Spiel mit Dimensionen können wir trotzdem die Dicke des einzelnen Objekts bestimmen.

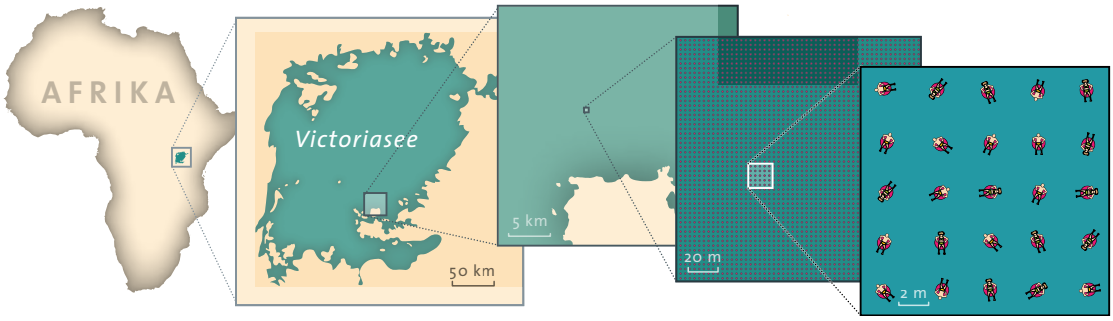
Wir füllen ein bestimmbares Volumen, sagen wir einen Würfel von makroskopisch messbarer Kantenlänge, mit Erbsen (wie viele das sind, können wir nicht wissen) und schütten sie sorgfältig auf den Fußboden, so dass nirgends eine Erbse auf eine andere zu liegen kommt. Dann ist die (messbare) Fläche des Erbsenteppichs mal die unbekannte Dicke einer Erbse gleich dem zuvor gemessenen Gesamtvolumen – also kann man aus den beiden Messgrößen die Erbsendicke bestimmen.

Mit echten Atomen statt Erbsen geht das so: Man präpariert eine genau bemessene Mischung aus wenig Öl und viel Benzin und gibt einen Tropfen davon vorsichtig auf eine Wasseroberfläche. Das Benzin hilft dem Öl, sich in einer nur ein Molekül dicken Schicht auf dem Wasser zu verteilen, und verdunstet dann rasch. Übrig bleibt ein Ölfleck. Man misst dessen Fläche, indem man beobachtet, wie weit er zuvor auf der Wasseroberfläche ausgestreutes Lycopodium (Bärlappsporen) wegschiebt. Wie bei den Erbsen gewinnt man daraus eine Größenordnung für die Länge eines Ölmoleküls und damit auch für die Durchmesser seiner Atome.

Historisch ist der Ölfleckversuch von großer Bedeutung. Immerhin war es noch am Ende des 19. Jahrhunderts fast eine Glaubensfrage, ob man Atome für wirkliche Objekte oder bestenfalls eine nützliche Modellvorstellung hielt. Inzwischen erlauben uns Geräte wie das Tunnelmikroskop einen etwas direkteren Blick auf einzelne Atome.

Mordanschlag oder Scherzaufgabe?

Was geschieht, wenn man an Stelle der Ölmoleküle Menschen verwendet? Im Sommer 1998 hatte der Regietheaterregisseur Christoph Schlingensief die vier Millionen Arbeitslosen in Deutschland aufgefordert, gleichzeitig, nämlich am 2. August, in dem 13 Quadratkilometer großen See zu baden, an dem Bundeskanzler Helmut Kohl in jedem Sommer Urlaub zu machen pflegte. Kohl sollte damit zumindest durch das Überlaufen des Sees erschreckt werden. Eine spätere Literaturnobelpreisträge-



Alle Menschen dieser Welt könnten zugleich im Victoriasee planschen – mit durchaus komfortablen drei Meter Abstand zu den Nachbarn.

rin fürchtete für den Fall ihrer Teilnahme um ihr Leben, und die »New York Times« sprach am 25. August 2010 in einem Nachruf auf den inzwischen verstorbenen Schlingensief von einer »theoretisch möglichen« Überflutung des ganzen Salzkammerguts.

Ein Parteifreund des Regisseurs hat immerhin die Grundrechenarten angewandt und ausgerechnet, dass 4 Millionen mal 0,06 Kubikmeter (das durchschnittliche Körpervolumen eines Erwachsenen) geteilt durch 13 Quadratkilometer nur knapp 2 Zentimeter sind. Um den Wasserspiegel um die eigentlich beabsichtigten 2 Meter steigen zu lassen, bräuchte man also die 100-fache Anzahl von Badegästen – und etliche Millionen Schnorchel, denn so viele Leute passen nicht nebeneinander auf die Oberfläche des Sees.

Denken Sie sich eine telefonzellenförmige Badewanne mit einem Quadratmeter Grundfläche. Um das Wasser darin um 2 Meter steigen zu lassen, müssten etwa 25 Menschen zugleich darin baden, wie Sie leicht abschätzen können. Auf einem See beliebiger Größe wäre die für diesen Anstieg erforderliche Bevölkerungsdichte die gleiche.

Nehmen wir für Wasserstandsschätzungen lieber einen See, der wesentlich größer ist als der Wolfgangsee, etwa den Victoriasee in Ostafrika mit seinen 69 000 Quadratkilometern, lassen dann aber auch alle sieben Milliarden Erdbewohner zugleich darin baden. Dadurch steigt der Wasserspiegel um ganze 4 Millimeter, und die Bevölkerungsdichte der Badenden beträgt etwas mehr als 100 000 pro Quadratkilometer – ein Gitter von Menschen mit drei Meter Abstand voneinander. So ein Zustand wäre mit Schwimmreifen nicht einmal unbequem, allerdings wäre die Anreise über mehrere hundert Kilometer Wasserfläche recht mühsam und müsste sorgfältig geplant werden. Die Schiffe, welche die Badenden an ihren Platz befördern, sollten ja die bereits Ausgesetzten möglichst nicht überfahren.

Da kann man sich schon eher vorstellen, dass alle Menschen weltweit gleichzeitig Badeurlaub an ihrer jeweils nächstgelegenen Meeresküste machen. Das Wasser steigt dabei in den Ozeanen um 1,2 Mikrometer. Allerdings lässt uns die Berechnung mit der Erbsenkette vermuten, dass die Leute nicht nebeneinander an der Küste stehen können, sondern in mehreren Reihen hintereinander ins Meer hinein ausweichen müssen, und das, obwohl die fraktale Küstenlinie länger ist als der Erdumfang.

Reale Bevölkerungsdichten

Gemittelt über die gesamte Erdoberfläche leben 13 Menschen pro Quadratkilometer, auf dem Landanteil rund 50. Das ist angesichts der großen kaum bewohnbaren Teile der Erde erstaunlich viel. Die Menschen sind sehr ungleichmäßig auf die Länder und Regionen verteilt, und je genauer man hinschaut, desto stärker sind die Abweichungen vom Durchschnitt.

Unter den Flächenstaaten in Europa halten die Niederlande den Rekord mit 402 Einwohnern pro Quadratkilometer, werden aber übertroffen von Nordrhein-Westfalen mit 523. Im Weltmaßstab führt Bangladesch mit rund 1000 die Liste an, wird aber in den Schatten gestellt von Zwergstaaten wie Monaco und dem Vatikan und vor allem grünflächenarmen Bezirken von Metropolen. Im 11. Arrondissement der Stadt Paris, das zwischen den Metrostationen Bastille, Nation und République liegt, leben über 40 000 Menschen pro Quadratkilometer. Wenn die Leute dort gleichmäßig auf die Bodenfläche verteilt ständen, hätte jeder von seinen Nachbarn nur fünf Meter Abstand. Es lebe die mehrstöckige Bauweise, also eine begrenzte Ausweitung in die dritte Dimension!

Hier könnte man Betrachtungen einfügen über Rekordversuche von möglichst vielen Menschen in einer Telefonzelle oder über die Größe von Kabinen oder Kojen in großen Schiffen. Die schlimmsten Fälle von Massenmenschenhaltung gab es wohl bei der Verschleppung von Sklaven über den Atlantik. Bei größeren Anzahlen wird deutlich, dass das, worauf es für die Menschen zum Wohnen ankommt, nicht das Volumen ist, sondern die Fläche, vor allem wegen der Zufuhr von Luft, Wasser und Licht.

Die Solarkonstante

Unsere Sonne ist bekanntlich eine ungeheuer ergiebige Energiequelle. Auch hier werden gewisse sehr große Zahlen erst vorstellbar, wenn man sie zum Beispiel durch die Anzahl der Menschen auf der Erde teilt.

Die Energiestromdichte des Sonnenlichts am Ort der Erde, die so genannte Solarkonstante, beträgt rund 1,38 Kilowatt pro Quadratmeter. Unser Blauer Planet schickt etwa ein Viertel von dem, was er bekommt, im Wesentlichen unverändert in den Weltraum zurück, bevor es den Boden erreicht (»Albedo«). Der Rest wird erst absorbiert und dann zeitversetzt in energieärmeren Photonen als Wärmestrahlung wieder abgegeben. Hinzu kommt noch etwas Energie aus dem Erdinneren.

Für uns nutzbar bleibt also rund ein Kilowatt auf jedem Quadratmeter des Erdquerschnitts übrig. Bei einer Kugel ist die Oberfläche genau viermal so groß wie diese Querschnittsfläche. Also trifft auf jeden Quadratmeter der Erdoberfläche, gemittelt über Tages- und Jahreszeiten und über alle Klimazonen, immerhin 1/4 Kilowatt Licht.

Ein Mensch hat einen Grundumsatz von rund einem Watt pro Kilogramm Körpermasse, also 100 Watt oder eher weniger. Das ist die Leistung, die er aus Nahrung und Sauerstoff bei deren Umwandlung in (hauptsächlich) CO_2 und Wasserdampf gewinnt und die wenige Wochen vorher grüne Pflanzen beim umgekehrten Vorgang (der Fotosynthese) dem Sonnenlicht entnommen haben. Wenn man dabei noch körperlich arbeitet, erhöht sich der Umsatz zeitweise auf ein Mehrfaches. Die Werte, die früher die Arbeiter beim Bau von Pyramiden oder Kathedralen erreichten, kommen heute fast nur noch bei der Tour de France vor.

Damit könnte man eigentlich ganz munter leben, aber in der Industriegesellschaft setzen wir mit Verkehrsmitteln, geheizten Wohnungen und (anteilig) mit Industrieanlagen pro Person und im Zeitmittel das 50- bis 100-Fache unseres Körpers um (5 Kilowatt in Europa und 10 in den USA) und bezahlen das auch: direkt an der Tankstelle, beim Heizölhändler oder Stromversorger, indirekt beim Kauf jedes Gegenstands, für dessen Herstellung Energie aufgewendet wurde (also praktisch aller Gegenstände). In der Energiebilanz ist das so, als würden im Sinn (echter) spätrömischer Dekadenz 50 Sklaven mit je 0,1 Kilowatt körperlich für Ihre Bequemlichkeit arbeiten. So gut wie wir hatte es die römische Oberschicht bei Weitem nicht, und das nicht nur, weil es viel weniger Sklaven gab, als unserer Energieverschwendung entsprechen würde.

Können wir denn dieses 50-Fache unserer eigenen Leistung überhaupt aus der aktuellen Sonnenenergie ziehen, wenn die fossilen Brennstoffe, die wir zurzeit 500 000-mal so schnell verfeuern, wie sie vor Jahrmillionen entstanden sind, in absehbarer Zukunft erschöpft sind? Auf jeden Quadratkilometer der Erdoberfläche, auf dem im Mittel die erwähnten 13 Menschen wohnen, strahlen nach Abzug der Albedo durchschnittlich 250 Megawatt, pro Person also knapp 20 Megawatt. Das ist deutlich mehr als der Grundumsatz von 100 Watt pro Person; es übertrifft sogar den »technischen Umsatz« von 5 Kilowatt um drei bis fünf Zehnerpotenzen. Hier ist also noch viel Platz. Wir müssen nur einen sehr kleinen Teil des Erdbodens für Landwirtschaft oder Sonnenkollektoren in Anspruch nehmen, können uns bei der Bereitstellung und beim Verbrauch von Energie mit schlechten Wirkungsgraden zufriedengeben, und für die anderen Teile der Biosphäre bleibt immer noch das meiste übrig. Jedenfalls scheitert die Absicht, unseren Energieluxus allein aus der gegenwärtigen Leistung der Sonne (Wasser- und Windkraft eingeschlossen) zu befriedigen, nicht daran, dass die Sonne zu wenig liefern würde.

Leistung pro Masse

Ein Studienkollege von mir war sehr stolz auf das beschleunigungsgünstige Verhältnis aus Leistung und Masse seines leicht übermotorisierten Kleinwagens. Dieses Verhältnis ist für ein Auto bei Vollgas um bis zu drei Zehnerpotenzen größer als für einen ruhenden Menschen, zum Glück aber nicht im Zeitmittel rund um die Uhr. Für große Schiffe ist es kaum größer als für Menschen, für Flugzeuge dagegen vergleichbar den Autos.

Will ein Mensch sich mit möglichst geringem Leistungsaufwand fortbewegen, sind die Wadenmuskeln optimal: recht bequem auf dem Fahrrad, deutlich anstrengender aber im »Gossamer Albatross«, mit dem der Mensch nicht nur segeln, sondern mit eigener Kraft fliegen kann (wie 1979 über den Ärmelkanal). Dazu muss der Flieger das Leistungs-Masse-Verhältnis eines trainierten Radrennfahrers aufbringen, also deutlich mehr als das eine Watt pro Kilogramm. Vergleicht man verschiedene Tierarten, so ist dieses Verhältnis umso größer, je kleiner das Tier ist. Für Säugetiere und Vögel gilt die Regel von Kleiber mit dem Exponenten 3/4 (SdW 5/2010, S. 32). Die kleinsten von ihnen kommen auf etwa 10 Watt pro Kilogramm Grundumsatz.

Wie mag das Verhältnis für einen Stern wie die Sonne sein? Sie liefert bei uns, also in 150 Millionen Kilometer Abstand, die genannten 1,38 Kilowatt pro Quadratmeter ab. Da sie keine Richtung bevorzugt, errechnet sich daraus die Leistung $4 \cdot 10^{26}$ Watt. Geteilt durch ihre Masse von $1{,}97 \cdot 10^{30}$ Kilogramm ergibt das 0,2 Milliwatt pro Kilogramm.

Wenn eine wohlmeinende Fee jedem einzelnen Menschen ein Stück von der Sonne mit der für ihn ausreichenden Leistung von 100 Watt schenken wollte, müsste dieses so schwer sein wie 80 000 Menschen, passend aus inneren und äußeren Teilen der Sonne gemischt und trotzdem zur Kernfusion fähig, wie immer das gehen mag. Aufbewahrung und Handhabung werfen weitere Probleme auf.

Gemessen an Lebewesen oder technischen Geräten leistet die Sonne also in Relation zu ihrer Masse ausgesprochen wenig. Wir sollten aber nicht vergessen, dass diese 80 000 Menschenmassen Sonnenmaterial auch den Brennstoff für noch Milliarden von Jahren in sich enthalten. Im Gegensatz zu einem Vogel oder Flugzeug muss die Sonne ja niemals auftanken. Wir sollten froh darüber sein, dass die schwache Wechselwirkung die Kernfusion so langsam ablaufen lässt. ~

DER AUTOR

Norbert Treitz ist pensionierter Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen.

WEBLINKS

www.berliner-zeitung.de/archiv/muss-kohl-nach-hause-fahren-,10810590,9447002.html
Die »Berliner Zeitung« über Schlingensief und seine Badeaktion

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1152348

Die Geometrie der Horizonte

Mathematiker versehen abstrakte geometrische Räume mit einem Rand, der wie die Fluchtpunkte in der perspektivischen Malerei das Unendliche einfängt. Dieses neue theoretische Werkzeug hat Anwendungen weit über die Geometrie dieser Räume hinaus gefunden.

Von Françoise Dal'Bo-Milonet

Für uns ist es ein vertrautes Bild: Zwei parallele Geraden – zum Beispiel Eisenbahnschienen oder Straßenränder – scheinen sich in einem Punkt zu treffen. Auf einer Fotografie oder Zeichnung tun sie das auch. Aber in Wirklichkeit schneiden sie sich nirgends; das ist schließlich die Definition von parallel. Die Maler der Renaissance im 15. Jahrhundert setzten als Erste diesen Schnittpunkt zweier Parallelen, den es eigentlich gar nicht gibt, als Fluchtpunkt auf die Leinwand. Das löste eine Revolution in der bildenden Kunst aus: die Eroberung der Perspektive.

Damit hatten die Künstler den unendlich fernen Horizont in die Ebene hineingeholt, handhabbar gemacht und nebenbei den fundamentalen Unterschied zwischen dem Endlichen und dem Unendlichen ein bisschen gemildert. Zwei Jahrhunderte später vollzog der Architekt und Mathematiker Girard Desargues (1591–1661) diesen Schritt in wissenschaftlicher Strenge nach. Um die verschiedenen Methoden der perspektivischen Darstellung zu vereinheitlichen, entwarf er eine Struktur, welche die gewöhnliche Ebene enthält, in der aber zwei Geraden sich stets schneiden – auch parallele. Deren Schnittpunkt ist ein »unendlich ferner Punkt«, und alle unendlich fernen Punkte zusammen bilden die unendlich ferne Gerade. Damit legte er den Grundstein für das, was man heute »projektive Geometrie« nennt.

Im damaligen Bewusstsein war jedoch die Geometrie, die der antike Mathematiker Euklid (325–265 v. Chr.) auf einen kleinen Satz von Axiomen gegründet hatte (womit er auf Jahrtausende stilbildend für die Mathematik wirkte), die einzige überhaupt denkbare. Diesen Alleinvertretungsanspruch anzufechten, kam einer Revolution gleich; da Desargues zudem seine Werke in einem wenig wissenschaftlichen Stil verfasst hatte, geriet er bald in Vergessenheit.

Erst im 19. Jahrhundert wandten die Wissenschaftler ihre Aufmerksamkeit über die geometrischen Figuren hinaus dem Raum zu, der sie enthält. Um 1850 wurde die erste nichteuklidische Geometrie entdeckt, und just zu dieser Zeit erwachten auch Desargues' Ideen aus ihrem Dornröschenschlaf. Man fasste die unendlich fernen Punkte der projektiven Geometrie in einen formalen Begriffsrahmen, dessen Weiterentwicklung heute »visueller Rand« heißt.

In den letzten 40 Jahren haben die Mathematiker, allen voran der Amerikaner George Mostow, diese Beziehung zu einem wertvollen theoretischen Instrument ausgebaut. Mit seiner Hilfe lassen sich Probleme aus einem unbegrenzten geometrischen Raum in einen begrenzten übertragen, der auch noch weniger Dimensionen hat. Die Vorteile dieses Ansatzes seien an zwei Gegenständen der aktuellen Forschung erläutert: hyperbolischen Mannigfaltigkeiten, das sind geometrische Objekte, an denen Topologen und Kosmologen arbeiten, und regelmäßigen nichteuklidischen Pflasterungen.

Der hyperbolische Raum

Schon seit der Antike war das fünfte Postulat in der Geometrie des Euklid, das berüchtigte Parallelenaxiom, Gegenstand intensiver Diskussion. In seiner bekanntesten Version besagt es, dass es durch einen Punkt *P* der Ebene, der nicht auf einer Geraden *g* liegt, genau eine Gerade gibt, die *g* nicht schneidet (Bild S. 62/63 oben, @). Da diese Aussage schon vom Wortlaut her viel weniger elementar ist als die anderen Axiome, haben die Mathematiker mehr als zwei Jahrtausende lang ihrem Status als (unabhängigem) Axiom misstraut und versucht, sie aus den übrigen vier Axiomen herzuleiten.

Erst in der Mitte des 19. Jahrhunderts wurde klar, warum diese Versuche zum Scheitern verurteilt waren. Das fünfte Axiom ist in der Tat unabhängig von den anderen, denn es gibt »nichteuklidische« Geometrien: solche, die zwar die ersten vier Axiome, nicht aber das fünfte erfüllen. Die ersten

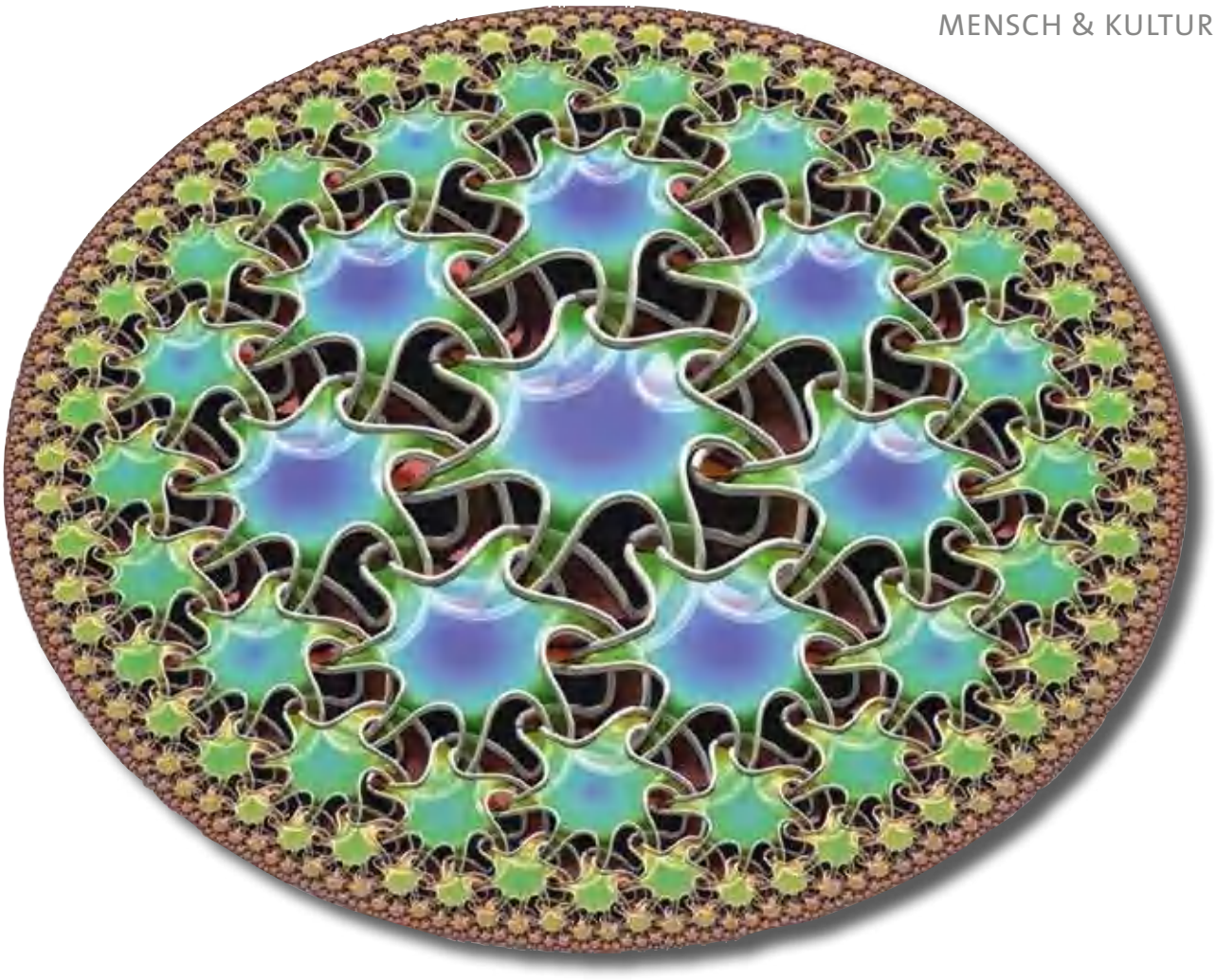
AUF EINEN BLICK

KOMPAKTIFIZIERUNG

1 Mathematiker haben Methoden entwickelt, um den **Horizont eines unbeschränkten geometrischen Raums** in einen endlichen Rand zu verwandeln, der den Raum abschließt.

2 Mit ihrer Hilfe können sie schwierige Probleme **auf einfachere Räume übertragen** und dadurch besser zugänglich machen.

3 Diese Methoden lassen sich insbesondere bei Flächen und ihren Verallgemeinerungen, den **»Mannigfaltigkeiten«**, **sowie in der Zahlentheorie** anwenden.



PAUL NYLANDER, WWW.BUGMAN123.COM

Eine künstlerische Darstellung, von der hyperbolischen Kreisscheibe inspiriert: Der eigentlich unendlich ferne Horizont entspricht dem Rand des Kreises.

Beispiele haben der Ungar János Bolyai (1802–1860) und der Russe Nikolai Lobatschewski (1792–1856) veröffentlicht. Schon davor hatte Carl Friedrich Gauß (1777–1855), der »Fürst der Mathematiker«, Vergleichbares gefunden, aber aus Furcht vor den Anfeindungen seiner Fachkollegen unveröffentlicht im Schrank liegen lassen – was diese verständlicherweise nicht begeisterte. Der neu entdeckte nichteuklidische Raum, der »hyperbolisch« heißt, ähnelt in vieler Hinsicht der euklidischen Ebene, aber mit einem entscheidenden Unterschied: Der kürzeste Weg zwischen zwei Punkten ist kein euklidisches Geradenstück. An die Stelle der Geraden treten die so genannten Geodäten (Linien kürzesten Weges), und die erfüllen das fünfte Axiom nicht, wie wir sehen werden.

Die Sphäre, ein unerlaubter geometrischer Raum?

Es gibt einen weiteren Raum, in dem das fünfte Axiom nicht gilt: die Sphäre, das ist der Rand einer dreidimensionalen Kugel. Die Mathematiker kannten sie natürlich, kamen aber, wohl wegen der unangefochtenen Herrschaft der euklidischen Geometrie, jahrhundertelang nicht auf die Idee, sie als eigenständigen Raum ernst zu nehmen. Nur Kosmologen haben bisweilen darüber nachgedacht, ob unser Universum einer 3-Sphäre – das heißt dem dreidimensionalen Rand einer vierdimensionalen Kugel – gleichen könnte und damit sowohl grenzenlos als auch von endlichem Volumen wäre.

Seefahrer wissen es schon lange: Der kürzeste Weg zwischen zwei Punkten auf der Oberfläche der Erde liegt auf einem Kreis, dessen Mittelpunkt mit dem der Erde zusammenfällt: einem Großkreis (Bild S. 62/63 oben, *b*). Zwei Großkreise (»Geodäten der Sphäre«) schneiden sich stets. Es gibt also durch einen Punkt P außerhalb einer Geodäten g keine Parallele zu g. Hier und im Folgenden sollen zwei Geodäten parallel heißen, wenn sie sich nicht schneiden.

Überkreuzen sich zwei Geodäten stets in mindestens einem Punkt, dann muss der zugehörige Raum von begrenztem Volumen (genauer: kompakt, siehe Kasten S. 64) sein. Das aber, so der Historiker François Russo, war nicht mit der Vorstellung der Mathematiker von einem Raum vereinbar – nicht einmal für Lobatschewski und Bolyai.

Der Deutsche Bernhard Riemann (1826–1866) hat dieses Denkhindernis aus dem Weg geräumt, indem er an die Stelle der noch unklaren Vorstellungen von einem Raum den präzisen Begriff der Mannigfaltigkeit setzte. Das ist eine Menge, die »lokal«, also in der näheren Umgebung jedes ihrer Punkte, aussieht wie ein euklidischer Raum fester Dimension n.

Die euklidische Ebene: Zu einer gegebenen Geraden g und einem Punkt P, der nicht auf g liegt, gibt es genau eine Gerade, die durch P geht und g nicht schneidet.

Die Sphäre: Zu einer gegebenen Geodäte g und einem Punkt P, der nicht auf g liegt, schneiden alle Geodäten durch P die Gerade g.

Die hyperbolische Kreisscheibe: Die (hyperbolische) Länge einer infinitesimal kurzen Strecke $[M,N]$ ist gleich $|MN|/(1-r^2)$, wobei $|MN|$ deren euklidische Länge bezeichnet.

Einige Eigenschaften der euklidischen Ebene (a) und zweier nichteuklidischer Räume: der Sphäre (b) und der hyperbolischen Kreisscheibe (c bis f).

Die Sphäre ist eine spezielle Mannigfaltigkeit der Dimension 2 und steht als solche gewissermaßen gleichberechtigt neben den Räumen von Euklid und Bolyai-Lobatschewski.

Seitdem gehören alle drei Geometrien, die euklidische, die hyperbolische und die sphärische, zum festen Bestand der Mathematik. Jede Mannigfaltigkeit fällt in eine der drei Klassen; welche es ist, kann man für besonders regelmäßige Exemplare daran erkennen, wie sich deren Geometrie zum Parallelenaxiom verhält. Wie viele Parallelen gibt es zu einer Geodäten g durch einen Punkt P, der nicht auf g liegt?

- Gar keine: Dann ist die Geometrie sphärisch;
- genau eine: euklidisch;
- mehr als eine (dann gleich unendlich viele): hyperbolisch.

Euklidische und hyperbolische Länge

In welchem Sinn existiert der Raum von Bolyai und Lobatschewski? Die beiden Mathematiker hatten nur eine abstrakte Beschreibung abgegeben. Das erste konkret handhabbare Modell stammt von dem Franzosen Henri Poincaré (1854–1912): die hyperbolische Kreisscheibe.

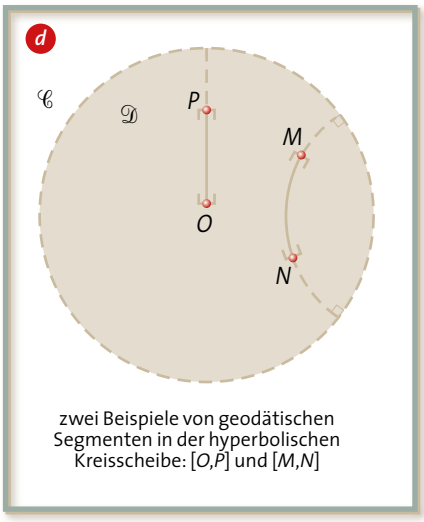
Man nehme dazu eine Kreisscheibe $\mathcal{D}$ mit Mittelpunkt O und Radius 1 in der euklidischen Ebene. Der Rand $\mathcal{C}$ des Kreises gehört schon nicht mehr dazu. Auf dieser »offenen« Scheibe erlassen wir eine neue Vorschrift zur Entfernungsmessung: Der Abstand zwischen einem Punkt M, der den euklidischen Abstand r vom Mittelpunkt hat, und einem dicht benachbarten Punkt N sei gleich deren euklidischem Abstand geteilt durch $(1-r^2)$ (Bild oben, c).

Merkwürdigerweise genügt es festzulegen, wie sehr kleine (»infinitesimale«) Entfernungen bestimmt werden sollen (exakt gilt diese Festlegung sogar nur im Grenzwert verschwindend kleiner Entfernungen). Um die Länge eines Kurvenstücks zu bestimmen, legt man eine Reihe von Punkten auf die Kurve und approximiert die Länge der Kurve durch die Summe der Entfernungen von einem Punkt zum nächsten. Legt man die Punkte immer dichter, so dass die Entfernungen benachbarter Punkte immer kleiner werden, dann strebt der Näherungswert gegen die exakte Länge der Kurve. Die Entfernung zweier – nicht unbedingt dicht benachbarter – Punkte M und N ist gleich der Länge der kürzesten Kurve von M nach N.

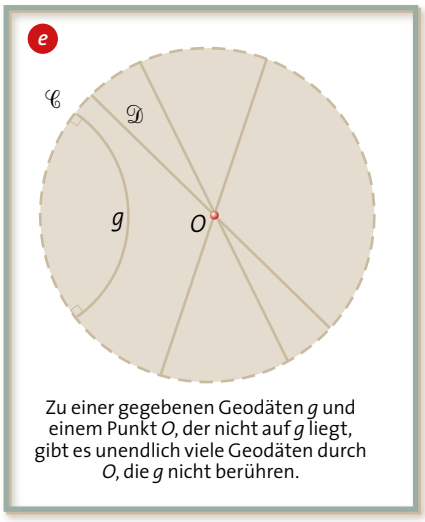
In der Mitte der Kreisscheibe, wo r annähernd gleich null ist, verhalten sich die Entfernungen so, wie wir es gewohnt sind. Gegen den Rand zu werden sie jedoch immer größer, weil der Nenner $1-r^2$ der Null immer näher kommt. Der Rand der Kreisscheibe selbst ist gar nicht erreichbar, weil der Weg dorthin unendlich lang ist.

Die poincarésche Kreisscheibe ist gewissermaßen ein Bild der unendlich ausgedehnten hyperbolischen Ebene, das mit einem sehr merkwürdigen Vergrößerungsglas (eigentlich Verkleinerungsglas) gewonnen wurde (Spektrum der Wissenschaft 10/1990, S. 12). Die Punkte in der Mitte bildet es einigermaßen korrekt ab. Die weitab vom Mittelpunkt gelegenen Gebiete werden dagegen so stark verkleinert, dass die ganze unendliche Welt in diese endliche Kreisscheibe passt. In der hyperbolischen Wirklichkeit des Bilds auf S. 61 sind die siebenarmigen Tintenfische alle gleich groß. Dass sie gegen den Rand zu immer kleiner zu werden scheinen, liegt an der Verzerrung durch das Verkleinerungsglas.

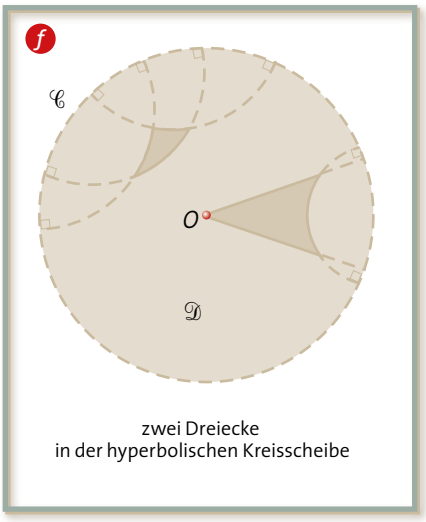
Man kann zeigen, dass die Geodäten in der poincaréschen Kreisscheibe genau die Kreisbögen sind, die den Randkreis $\mathcal{C}$ in zwei Punkten schneiden und in diesen Punkten senkrecht auf ihm stehen, plus die Kreisdurchmesser, also die euklidischen Geradenstücke, die durch den Mittelpunkt O gehen (und ebenfalls $\mathcal{C}$ im rechten Winkel schneiden). Anders ausgedrückt: Die kürzeste Verbindung zweier Punkte M und N liegt auf der euklidischen Geraden durch M und N, falls diese durch O verläuft, ansonsten auf dem Kreisbogen durch M und N, der den Außenkreis $\mathcal{C}$ zweimal rechtwinklig schneidet (Bild oben, d). Wie im euklidischen Fall bestimmen zwei Punkte eindeutig eine Geodäte.



zwei Beispiele von geodätischen Segmenten in der hyperbolischen Kreisscheibe: [*O*,*P*] und [*M*,*N*]



Zu einer gegebenen Geodäten *g* und einem Punkt *O*, der nicht auf *g* liegt, gibt es unendlich viele Geodäten durch *O*, die *g* nicht berühren.



zwei Dreiecke in der hyperbolischen Kreisscheibe

ALLE GRAFIKEN DES ARTIKELS: POUR LA SCIENCE

In dieser neuen Geometrie ist die Aussage des fünften euklidischen Axioms falsch. Tatsächlich gibt es zu einer gegebenen Geodäten, zum Beispiel einem Kreisbogen, unendlich viele andere Geodäten, die diese nicht treffen, also zu ihr parallel sind. Ein Beispiel ist ein geeignetes Bündel von Kreisdurchmessern (Bild oben, *e*).

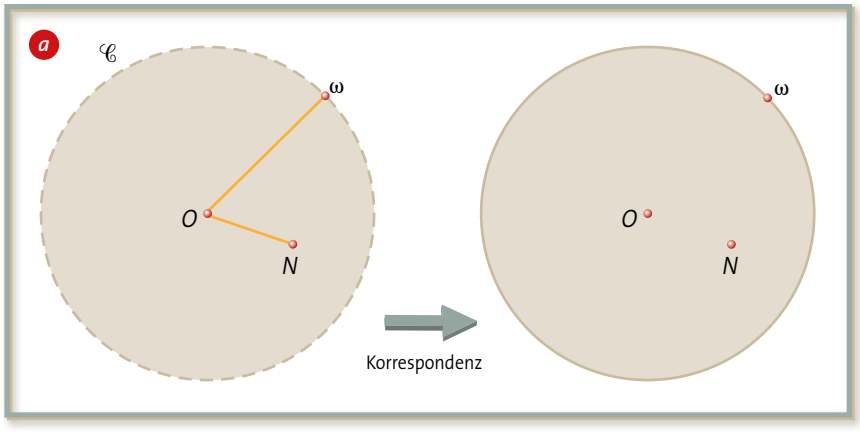
Ein Dreieck in der hyperbolischen Ebene besteht wie ein euklidisches aus drei Punkten, die durch Geodätenstücke miteinander verbunden sind. Bemerkenswerterweise ist die Winkelsumme im hyperbolischen Dreieck stets kleiner als 180 Grad (Bild oben, *f*); mehr noch: Sie kann jeden Wert kleiner als 180 Grad annehmen, im Gegensatz zur Winkelsumme eines euklidischen Dreiecks, die stets gleich 180 Grad ist.

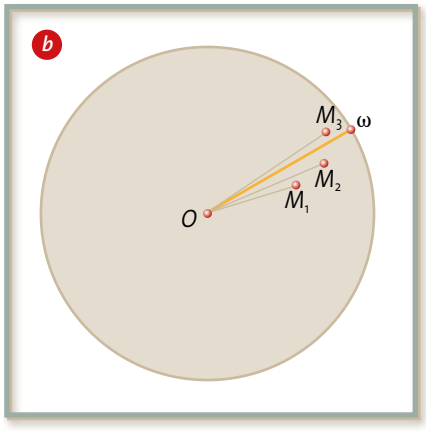
In einem gewissen Sinn ist die hyperbolische Geometrie weniger rigide als die euklidische. Sie erlaubt Dinge wie zum Beispiel Fünfecke mit fünf rechten Winkeln oder gar – in drei Dimensionen – Dodekaeder aus solchen Fünfecken (Bild S. 67), die in der klassischen Geometrie unmöglich sind.

Die Kreislinie $\mathscr{C}$ ist ein legitimer Bestandteil der euklidischen Ebene, aber in der hyperbolischen Welt gibt es sie eigentlich nicht, denn sie ist ja unendlich weit von allen Punkten in $\mathscr{D}$ entfernt. Wie kann man diesen nichtexistenten Kreis in hyperbolischen Begriffen beschreiben? Stellen wir uns vor, der Punkt *O* sei eine Lichtquelle, die in alle Richtungen leuchtet. Das Licht breitet sich entlang der Geodäten aus, also in diesem Fall in (euklidisch) gerader Linie von *O* zu einem Punkt ω auf $\mathscr{C}$. Da diese Geodäten (hyperbolisch gemessen) unendlich lang sind, kann man sich ω als einen Punkt am Horizont vorstellen.

Indem man jedem unendlichen Lichtstrahl von *O* in Richtung ω den Punkt ω zuordnet, erhält man eine Korrespondenz zwischen der Menge der Strahlen aus *O* und der Kreislinie $\mathscr{C}$. Ebenso ordnet man einem hyperbolischen Lichtstrahl endlicher Länge, der von *O* bis zu einem Punkt der hyperbolischen Kreisscheibe verläuft, seinen Endpunkt zu (Bild unten, *a*). Damit haben wir eine gemeinsame Beschreibung für die hyperbolische Kreisscheibe $\mathscr{D}$ und den Randkreis $\mathscr{C}$ gefunden. Jeder Punkt aus $\mathscr{D}$ oder $\mathscr{C}$ ist ein – endlich oder unendlich langer – Strahl mit Ausgangspunkt *O*. Auf diese Wei-

Man identifiziere jeden unendlichen Lichtstrahl, der von *O* ausgeht, mit dem Punkt ω des Horizonts $\mathscr{C}$, in dessen Richtung er leuchtet, und jeden endlichen Strahl von *O* bis *N* mit seinem Endpunkt *N*. Dadurch wird die hyperbolische Kreisscheibe Teil eines größeren Raums, der kompakt ist und seinen Horizont enthält (*a*). In diesem Raum konvergiert die Folge $M_1, M_2, M_3, \ldots$ gegen ω (*b*).





Kompakte Räume

Wozu will man einen unendlichen Raum auf etwas Endliches zusammenziehen?

Viele mathematische Argumentationen verwenden unendliche Folgen $a_1, a_2, a_3, \ldots$ Die Folgenglieder a_i können Punkte eines Raums sein, wobei ein »Raum« in der Mathematik nichts weiter ist als eine Menge, zu deren Elementen (den »Punkten« des Raums) man eine – möglicherweise sehr schwammige – Aussage darüber treffen kann, ob sie nahe beieinanderliegen.

Das Interessanteste an den Folgen ist, dass manche von ihnen einen Grenzwert haben. Das ist ein Punkt, dem die Folgenglieder von einer gewissen Nummer an beliebig nahe kommen. Typischerweise ist der Grenzwert ein Punkt, den man haben will (zum Beispiel die Lösung einer Gleichung), aber nicht auf direkten Weg ansteuern kann; man findet nur Punkte in seiner Nähe.

Eine Folge, die zum Beispiel in immer gleichen Schritten in einem euklidischen Raum geradeaus wandert, hat keinen Grenzwert. Eine Folge, deren Glieder innerhalb eines endlichen Volumens – sagen wir einer Kugel – verbleiben, hat auch nicht unbedingt einen Grenzwert, aber immerhin kann man aus ihr eine Teilfolge (mit ebenfalls unendlich vielen Gliedern) auswählen, die einen Grenzwert hat (konvergiert).

Ein Raum, in dem jede Folge eine derartige konvergente Teilfolge hat, heißt kompakt (genauer: folgenkompakt). Solche Räume machen dem Mathematiker das Leben einfacher, weil er den Fall einer Folge ohne konvergente Teilfolge nicht mehr gesondert berücksichtigen muss.

se wird die hyperbolische Kreisscheibe Teil eines größeren Raums, der seinen Horizont enthält.

Die wesentliche Eigenschaft dieses neuen Raums ist seine Kompaktheit (Kasten oben): Es kommt nicht mehr vor, dass eine Folge von Punkten nur deshalb keinen Grenzwert hat, weil sie ins Unendliche läuft. Vielmehr definiert man, dass eine Folge $M_1, M_2, M_3, \ldots$ gegen einen Horizontpunkt ω konvergiert, wenn der (hyperbolische) Abstand der Folgenglieder M_i von O gegen unendlich und ihr von O aus gesehener Winkel zu ω gegen null geht (Bild S. 63 unten, *b*).

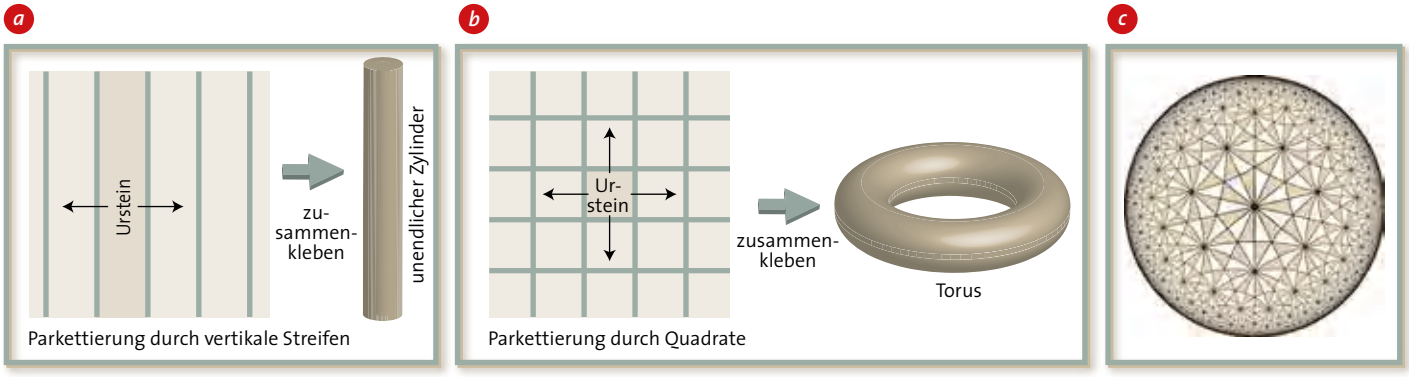
Entgegen dem Anschein spielt der Scheibenmittelpunkt O keine besondere Rolle. Er ist nur ein willkürlich ausgewählter Punkt, auf den man sich festlegt, um Punkte und Entfernungen beschreiben zu können – wie der Nullpunkt eines euklidischen Koordinatensystems. Setzt man diesen durch eine einfache Parallelverschiebung (Translation) an eine andere Stelle, so ändert sich nichts Wesentliches. Ebenso kann man ohne nennenswerte Konsequenzen durch eine hyperbolische Translation einen beliebigen anderen Punkt ins Zentrum der poincaréschen Kreisscheibe rücken. Insbesondere konvergiert nach einer solchen Koordinatentransformation jede Folge gegen denselben Horizontpunkt wie zuvor – wenn überhaupt. Die Koordinatentransformation verschiebt gewissermaßen nur unser Verkleinerungsglas, ändert aber nichts an der hyperbolischen Ebene selbst.

Der visuelle Rand, ein Spiegel des Raums

Dieses Verfahren, einen geometrischen Raum durch einen Horizont, einen »visuellen Rand«, zu kompaktifizieren, hat sich seit den 1970er Jahren in der mathematischen Forschung durchgesetzt, insbesondere durch die Arbeiten des Amerikaners Patrick Eberlein. Es funktioniert übrigens auch für euklidische Räume. Der visuelle Rand der euklidischen Ebene ist wie bei der hyperbolischen Ebene eine Kreislinie, denn deren Punkte lassen sich eindeutig den vom Ursprung ausgehenden Strahlen zuordnen (Bild rechts, *a*). Sie ist im Wesentlichen die moderne Form der unendlichen Geraden aus der projektiven Geometrie von Desargues.

Heute weiß man, dass in vielen Fällen der visuelle Rand wichtige Informationen über den Raum enthält, den er umschließt. So kann man aus der Tatsache, dass er ein Kreis ist, schließen, dass der Raum zweidimensional ist. Entsprechend gehört eine Sphäre als visueller Rand stets zu einem dreidimensionalen Raum. Ob dieser euklidisch oder hyperbolisch ist, verrät das zwar noch nicht; aber im Allgemeinen gibt der visuelle Rand über »seinen« Raum noch detailliertere Auskünfte, darunter wahrscheinlich etliche, die noch der Entdeckung harren.

Aus der Anschauung geboren, ist der visuelle Rand ein abstraktes, ungeheuer nützliches Konzept. Wenn es den Geometern gelingt, eine Frage, die sich in einem unbegrenzten Raum stellt, auf dessen visuellen Rand zu übertragen, so ist der neue Schauplatz des Geschehens nicht nur – im Gegen-



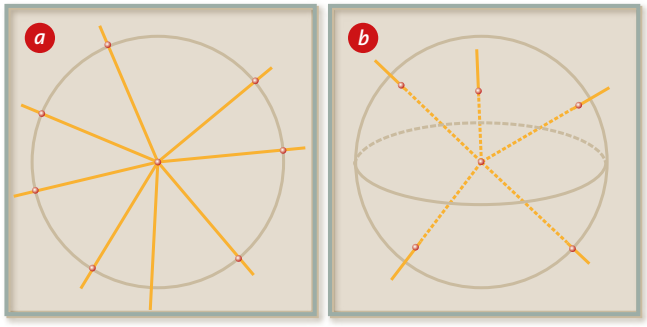
satz zum alten – kompakt, sondern auch einfacher, weil er eine Dimension weniger hat. Das ist besonders hilfreich bei der Untersuchung von so genannten Parkettierungen.

Von einer regulären Pflasterung zu ihrer Grenzmenge

Einen geometrischen Raum zu parkettieren, bedeutet, ihn lückenlos und überschneidungsfrei mit Figuren (»Parkettsteinen« oder »Kacheln«) zu bedecken, so wie man einen Fußboden kachelt. Eine Parkettierung heißt regulär, wenn sie aus lauter Exemplaren ein und desselben Parkettsteins (des »Ursteins«) besteht und es zu je zwei Steinen eine Kongruenzabbildung gibt, die nicht nur den einen Stein auf den anderen, sondern zugleich das gesamte Parkett auf sich selbst abbildet (Spektrum der Wissenschaft 5/2011, S. 73). Die Menge aller dieser Abbildungen hat die mathematische Struktur einer Gruppe; sie heißt Parkettierungsgruppe. Die Erforschung der regulären Parkettierungen läuft im Wesentlichen auf das Studium dieser Gruppen hinaus.

Die Parkettierungsgruppen in der euklidischen Ebene sind gut bekannt. Es gibt ihrer nur endlich viele, und sie bestehen aus Rotationen und Translationen. Ein Beispiel ist die Gruppe aller Translationen um Vielfache von 1 in horizontaler Richtung. Der zugehörige Urstein ist ein vertikaler (unendlich langer) Streifen der Breite 1. Oder man nimmt, wie bei der üblichen Badezimmerkachelung, als Urstein ein Quadrat und als Parkettierungsgruppe alle Translationen mit ganzzahligen Vektoren in horizontaler wie vertikaler Richtung (Bild unten, a und b).

Bei der hyperbolischen Kreisscheibe sind die Parkettierungsgruppen schwieriger zu beschreiben, und es gibt unendlich viele davon. Ein Beispiel kann man konstruieren, indem man als Urstein ein hyperbolisches Dreieck mit den Innenwinkeln $180°/p$,$180°/q$ und $180°/r$ nimmt. Dabei sind p, q und r ganze Zahlen, die zusätzlich die Bedingung $1/p+1/q+1/r<1$ erfüllen müssen, damit die Summe der Innenwinkel kleiner als 180 Grad ist. Um die Ecke mit dem Winkel $180°/p$ passen genau $2p$ Exemplare dieses Dreiecks, und zwar abwechselnd Bild und Spiegelbild; Entsprechendes gilt für die anderen Ecken (Bild unten, c). Indem man immer wieder ein Dreieck an einer seiner Seiten spiegelt (auch in der hyperbolischen Geometrie gibt es Spiegelungen), füllt man die ganze hyperbolische Ebene mit Kopien des Ursteins. Die Parkettierungsgruppe besteht also hier aus allen möglichen



Der visuelle Rand der euklidischen Ebene ist die Kreislinie (a), der des euklidischen Raums die Sphäre (b).

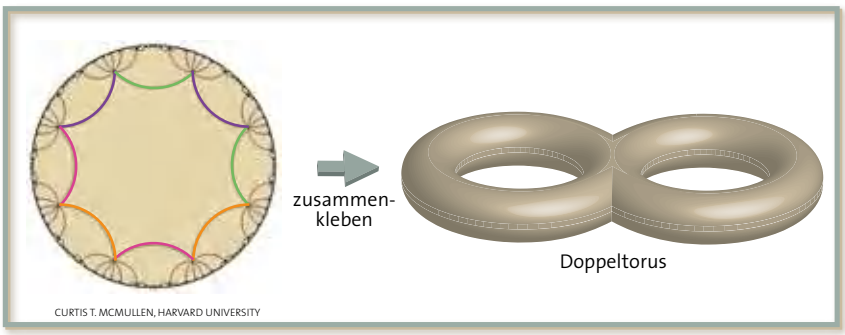
Kombinationen der drei elementaren Spiegelungen. In der poincaréschen Kreisscheibe scheinen die Dreiecke zum Rand hin immer kleiner zu werden, aber innerhalb der hyperbolischen Geometrie sind sie alle gleich groß.

Vor ungefähr 40 Jahren haben die Mathematiker das Konzept der »Grenzmenge« eingeführt. Es handelt sich um die Menge aller Grenzwerte von Punktfolgen, die durch wiederholtes Anwenden mehrerer Abbildungen entstehen. Die hübsch anzusehenden Figuren, die als »Indra's Pearls« populär geworden sind (Spektrum der Wissenschaft 1/2008, S. 72), sind Grenzmengen einer gewissen Gruppe von Abbildungen (Möbius-Transformationen der komplexen Ebene). Die Grenzmenge aller Abbildungen aus der Parkettierungsgruppe kann endlich sein, den ganzen visuellen Rand umfassen oder von fraktaler Struktur sein. Ihre Eigenschaften erlauben wertvolle Rückschlüsse auf die Parkettierung selbst.

Flächen durch Zusammenkleben von Parkettierungen erzeugen

Aus einer regulären Parkettierung der euklidischen Ebene, der hyperbolischen Kreisscheibe oder der Sphäre kann man durch einen Kunstgriff eine Fläche erzeugen – genauer: eine zweidimensionale Mannigfaltigkeit. Man stellt sich vor, dass alle Steine einer Parkettierung eigentlich ein und derselbe sind. Nur damit die Sache bequem in die Ebene passt, ist der Stein in mehreren Exemplaren dargestellt. So grenzt der vertikale Streifen aus dem Bild unten (a) mit seinem rechten Rand nicht an den linken Rand seines Nachbarstreifens, sondern an den linken Rand seiner selbst. Klebt man die Ränder

d



Eine Parkettierung der Ebene durch vertikale Streifen wird durch Identifizieren korrespondierender Punkte (»Zusammenkleben«) zu einem Zylinder unendlicher Höhe (a), eine Pflasterung durch Quadrate zu einem Torus (b). Die hyperbolische Kreisscheibe lässt sich auf unendlich viele Arten parkettieren, zum Beispiel mit Dreiecken (c) oder mit Achtecken (d). Wenn man bei dieser Parkettierung wieder zusammengehörige Randpunkte zusammenklebt, erhält man einen Doppeltorus.

so zusammen, wie sie zusammengehören, zeigt der Streifen seine wahre Gestalt: Es ist ein Zylinder. Entsprechend sind beim Badezimmerkachel-Quadrat nicht nur die linke und die rechte Seite zusammenzukleben, sondern auch die obere und die untere. Es ergibt sich ein Torus (Bild S. 64, b).

Während man den Zylinder noch aus Papier zusammenrollen kann, ist das beim Torus nicht mehr möglich. Aber das ist Nebensache: Auf dem Torus gilt dieselbe Abstandsmessung wie auf dem Quadrat, aus dem er entstanden ist.

Nicht alle Flächen sind euklidisch. Ein Gegenbeispiel ist die Sphäre: Sie lässt sich nicht durch Zusammenkleben aus einer Parkettierung der Ebene erzeugen. Ein weiteres Gegenbeispiel ist der Torus mit zwei Löchern (»Doppeltorus«): Er entsteht, wenn man die hyperbolische Ebene mit Achtecken pflastert, die zu acht um jede Ecke herumliegen (Bild S. 65 unten, d).

Die genannten drei Beispiele illustrieren die allgemeine Situation, die Poincaré ans Licht gebracht hat: Eine geschlossene Fläche ist entweder euklidisch, sphärisch oder hyperbolisch. Die ersten beiden Familien von Flächen haben nur endlich viele Elemente, die dritte ist unendlich.

Die letzte Aussage ist im Sinn der Topologie zu verstehen. In diesem Teilgebiet der Mathematik gelten zwei Flächen als im Wesentlichen gleich (»homöomorph«), wenn sie umkehrbar eindeutig aufeinander abgebildet werden können und die Abbildung ebenso wie ihre Umkehrung stetig ist. So gesehen ist die Oberfläche der knolligsten Kartoffel eine Sphäre, die einer Tasse mit Henkel ein Torus. Es stellt sich heraus, dass zwei geschlossene Flächen nur dann überhaupt topologisch verschieden sind, wenn ihr »topologisches Geschlecht« unterschiedlich ist. Diese Kennzahl ist gleich der Anzahl der Löcher, welche die Fläche aufweist: 0 für die Sphäre, 1 für den Torus, 2 für den Doppeltorus und so weiter.

Um zu wissen, welche Geometrie eine Fläche hat, genügt es also, ihr topologisches Geschlecht zu kennen. Das reicht allerdings nicht aus, um die Parkettierung zu rekonstruieren, aus der die Fläche entstanden ist. So gibt es unendlich viele reguläre Parkettierungen der hyperbolischen Ebene, die einen Doppeltorus ergeben. Diese Mehrdeutigkeit verschwindet jedoch, wenn es um Objekte höherer Dimension geht.

Die einfachsten unter ihnen sind dreidimensionale Mannigfaltigkeiten. Beispiele sind die (dreidimensionale) Vollkugel, der Volltorus und allgemein zu jeder geschlossenen Fläche der von ihr eingeschlossene Teil des Raums. Leider sind das die eher uninteressanten Fälle. Im Allgemeinen ist es unmöglich, eine dreidimensionale Mannigfaltigkeit im gewöhnlichen Raum zu visualisieren. Gleichwohl existieren diese abstrakten Objekte mathematisch gesehen.

Einer der ersten Mathematiker, der sich genauer für sie interessierte, ist der Amerikaner William Thurston (Spektrum der Wissenschaft 9/1984, S. 110). Für die Beiträge, die er in den 1970er Jahren auf diesem Gebiet leistete, erhielt er 1978 die Fields-Medaille. Im Zentrum seiner Arbeiten steht folgende Frage, welche die genannten Untersuchungen an Flächen nahelegen: Ist eine dreidimensionale Mannigfaltigkeit »geometrisierbar«? Das heißt, lässt sie sich aus einer Parkettierung eines geeigneten dreidimensionalen Raums, des »Modellraums«, erzeugen? Oder ist sie wenigstens in Teile zerlegbar, für die das gilt?

Diese tiefgründige Frage ist der Ausgangspunkt für viele Forschungsprojekte in der Topologie. Eine Antwort auf einen Spezialfall gibt die Poincaré-Vermutung, nach der jede kompakte dreidimensionale Mannigfaltigkeit ohne Löcher topologisch äquivalent zu einer dreidimensionalen Sphäre ist (dem Rand der euklidischen vierdimensionalen Kugel). Dem Russen Grigori Perelman gelang es 2003, die Vermutung zu beweisen (Spektrum der Wissenschaft 9/2004, S. 86) – eine Jahrhundertleistung, die vor allem dadurch öffentliches Aufsehen erregte, dass Perelman 2006 die ihm dafür verliehene Fields-Medaille ablehnte, ebenso später den mit einer Million Dollar dotierten Clay-Preis.

Die Geometrisierung von Flächen erfordert drei Modelle: die euklidische Ebene, die Sphäre und die hyperbolische Kreisscheibe. Für dreidimensionale Mannigfaltigkeiten braucht man acht. Darunter befinden sich »unser« euklidischer Raum und die hyperbolische Kugel, die aus einer gewöhnlichen euklidischen Vollkugel (ohne Rand) entsteht, indem man nach dem Vorbild der poincaréschen Kreisscheibe Abstände und damit Längen von Kurven neu definiert.

Reguläre Parkettierungen der hyperbolischen Kugel sind nicht einfach zu finden. Hat man aber eine (Bild rechts oben), so kann man wieder durch Zusammenkleben eine dreidimensionale Mannigfaltigkeit erzeugen, die man dann hyperbolisch nennt. Diese Objekte, die sich unserem intuitiven Verständnis entziehen, interessieren viele Topologen wegen ihrer komplexen Formen und ihrer Verbindung mit der mathematischen Knotentheorie. Kosmologen spekulieren mit ihrer Hilfe über die Topologie des Universums.

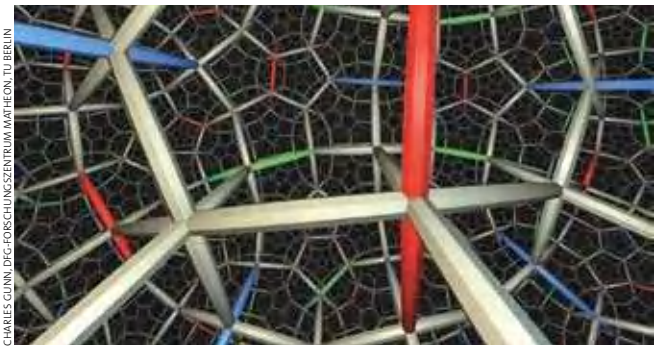
Anders als bei zweidimensionalen Flächen bestimmt bei dreidimensionalen hyperbolischen Mannigfaltigkeiten die Topologie die Geometrie. Das ist die Aussage des »Starrheitssatzes«, den George Mostow 1972 bewiesen hat: Zwei hyperbolische 3-Mannigfaltigkeiten, die tolopogisch homöomorph sind, haben die gleiche geometrische Struktur.

Beim Beweis seines Satzes macht Mostow in sehr origineller Weise Gebrauch vom visuellen Rand der hyperbolischen Kugel. Grob gesprochen beginnt die Darlegung mit einer regulären Parkettierung der Kugel durch einen beschränkten Urstein. Bei genauerer Untersuchung stellt man fest, dass die

W I S wissenschaft in die schulen!

Didaktische Materialien für den Unterricht zum Thema »Mathematik« kostenfrei herunterladen unter:

www.wissenschaft-schulen.de/fraktale



CHARLES GUNN, DFG-FORSCHUNGSZENTRUM MATHEON, TU BERLIN

Das Innere dieser hyperbolischen Kugel ist durch Dodekaeder gepflastert, die von lauter gleichseitigen Fünfecken mit je fünf rechten Winkeln begrenzt sind. Das Bild stammt aus dem Video »Not Knot« des inzwischen aufgelösten Geometry Center in Minneapolis (Minnesota).

zugehörige Parkettierungsgruppe anders als im euklidischen Fall nicht nur Translationen, Drehungen und Spiegelungen, sondern auch kompliziertere Transformationen enthält. Mostow wendet diese Transformationen auf die Punkte des visuellen Rands der hyperbolischen Kugel an. Das ist die Sphäre und damit ein beschränkter und nur noch zweidimensionaler Raum. Dies ausnutzend, kann Mostow zeigen, dass die Transformationen auf der Sphäre die ursprüngliche Parkettierung bereits eindeutig bestimmen.

Heute ist der Starrheitssatz von Mostow durch allgemeinere Aussagen etwas in den Schatten gestellt worden – aber die Idee, den visuellen Rand zu betrachten, lebt bei den Mathematikern des 21. Jahrhunderts fort. Darüber hinaus hat der »unendliche Rand« seit den Arbeiten von Mostow und dem Russen Grigori Margulis seinen Weg auch in die Arithmetik und die Zahlentheorie gefunden, nachdem unvermutete Verbindungen zwischen Zahlen und Kurven auf unbegrenzten Mannigfaltigkeiten zu Tage traten.

Der Rand bei unendlich für die Zahlentheorie

In den 1930er Jahren hatte der Brite John Littlewood die Vermutung ausgesprochen, dass es zu je zwei reellen Zahlen a und b stets ganze Zahlen p, q und r gibt, so dass die Größe $q^3(a-p/q)(b-r/q)$ der Null beliebig nahe kommt. Das läuft darauf hinaus, dass man die reellen Zahlen a und b nicht nur irgendwie durch rationale Zahlen annähern kann (das ist trivial), sondern dass man für eine gute Annäherung nicht allzu große Nenner benötigt, und das selbst dann, wenn der Nenner für beide Zahlen a und b derselbe ist. Bemerkenswerterweise kann man diese Vermutung in eine geometrische Formulierung umsetzen, die mit einer regulären Parkettierung eines achtdimensionalen Raums und einem Punkt auf dem visuellen Rand desselben arbeitet; dieser Punkt repräsentiert das Zahlenpaar (a, b).

Man untersucht nun eine Familie von Geodäten, die sämtlich gegen (a, b) streben, und analysiert, welche Steine der Parkettierung sie treffen. Auf diese Weise hat der junge Israeli Elon Lindenstrauss zusammen mit zwei Kollegen bewiesen, dass es entweder gar keine oder (in einem mathematisch präzisen Sinn) nur sehr wenige Fälle gibt, in denen die Vermutung von Littlewood nicht gilt; Lindenstrauss erhielt dafür 2010 die Fields-Medaille. Seine Arbeiten illustrieren eindrucksvoll die Stärke der Methode vom visuellen Rand.

In der euklidischen Ebene, in der hyperbolischen Kreisscheibe und in analogen Räumen höherer Dimension können Lichtstrahlen sich »mit Leichtigkeit fortpflanzen«: Für Geodäten in diesen Räumen existieren einfache und gut beherrschbare formelmäßige Darstellungen. Das ist nicht immer der Fall. Es gibt Flächen mit so vielen Löchern und Höckern, dass die Strahlen in völlig undurchschaubarer Weise abgelenkt werden. Das gilt zum Beispiel für einen Torus mit unendlich vielen Löchern oder die hyperbolische Fläche, die durch Zusammenkleben einer Parkettierung entsteht, deren Urstein ein Polygon mit unendlich vielen Seiten ist.

Um das Unendliche solcher Flächen zu konstruieren, benutzt man nicht mehr den visuellen Rand, sondern eine abstraktere Menge, den »Horo-Rand«, den der russisch-französische Mathematiker Mikhail Gromov (Spektrum der Wissenschaft 5/2009, S. 74) in den 1980er Jahren eingeführt hat. Seitdem sind noch weitere Begriffe für geeignete »Ränder« definiert worden.

Seit den Tagen des Girard Desargues sind die Räume, in denen die Mathematiker sich zu Hause fühlen, um ein Vielfaches komplizierter geworden, und ihr Vorstellungsvermögen kann ihnen schon lange nicht mehr helfen. Aber das grundsätzliche Arbeitsprinzip ist immer noch dasselbe: Man fängt das notorisch problematische Unendliche ein, indem man sich etwas Abstraktes zurechtdefiniert – wobei die Anschauung durchaus behilflich, aber nicht einengend sein darf – und dann den Nachweis führt, dass dieses Abstraktum einen brauchbaren Stellvertreter für das Unendliche abgibt. Wenn diese Gedankenkonstruktion, wie im Fall des visuellen Rands, dem Vorstellungsvermögen sogar entgegenkommt – umso besser. ~

DIE AUTORIN

Françoise Dal'Bo-Milonet ist Professorin für Mathematik an der Université Rennes 1; dort beschäftigt sie sich im Rahmen des universitätsübergreifenden Forschungsnetzes »Platon« mit den Zusammenhängen zwischen Geometrie, Ergodentheorie und Wahrscheinlichkeitstheorie.

QUELLEN

Gunn, C. (Regie): Knoten ohne Knoten (Not Knot). Video, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1992

Thurston, W.: Three-Dimensional Geometry and Topology 1. Princeton University Press, Princeton 1997

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1152349**

Helmut Dette

APOLLO 11

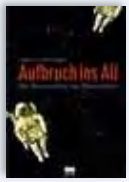
Der erste Flug zum Mond – Wahrheit oder Täuschung?

2006, 120 S. m. zahlr. meist farb. Abb., geb., Imhof

Bestell-Nr. 2391

früher € 19,95, jetzt nur € 7,95 (D), € 8,20 (A)

Wenn gleich in der Wissenschaft unbestritten, versuchen so genannte Verschwörungstheoretiker mit angeblichen Beweisen für eine Inszenierung die bemannten Expeditionen zum Mond in den Bereich der Fabel zu verweisen. Sind die Zweifel berechtigt? Das Buch schildert zunächst den Ablauf von Apollo 11 und setzt sich dann kritisch mit den so verblüffend überzeugend scheinenden Argumenten der Kritiker auseinander. Ein Zeitdokument, das die Tatsachen ins rechte Licht rückt.



Harro Zimmer

AUFBRUCH INS ALL

Die Geschichte der Raumfahrt

2007, 144 S. m. zahlr. meist farb. Abb. u. 1 Karte., geb., Primus

Bestell-Nr. 3622

früher € 36,00, jetzt nur € 9,99 (D), € 10,30 (A)

Der Start von Sputnik 1 am 4. Oktober 1957 läutete das Zeitalter der Raumfahrt ein. Seitdem sind über 50 Jahre vergangen, in der die Raumfahrttechnologie rasante Fortschritte gemacht hat. Harro Zimmer erzählt diese spannende Geschichte, nicht ohne dabei auch auf die Trends zukünftiger Entwicklungen hinzuweisen.

Siegfried Bäumler

HEILPFLANZENPRAXIS HEUTE

Porträts – Rezepturen – Anwendung

2010, XIV, 989 S. m. 217 Farbabb., geb., Elsevier

Bestell-Nr. 3624

früher € 84,95, jetzt nur € 29,95 (D), € 29,95 (A)

Auf Grundlage der rationalen und der erfahrungsheilkundlichen Phytotherapie bietet das Werk Grundlagenwissen, Arzneipflanzenporträts, Phytotherapeutische Praxis, Rezepturen und eine Indikationsliste zum schnellen Nachschlagen.

KOMPAKTLEXIKON MEDIZIN

3., neu bearb. u. erw. Aufl. 2004, 934 S. m. 520 Farbabb. u. 80 Tab., kart., Elsevier

Die handliche Sonderausgabe – jetzt zum günstigen Preis!

Bestell-Nr. 3625

früher € 24,95, jetzt nur € 9,99 (D), € 10,30 (A)

Die Sonderausgabe der Auflage 2004 ist ein kompaktes, handliches Medizinlexikon mit über 23.000 Stichwörtern, 520 farbigen Abbildungen und 80 Tabellen. Der praktische Anhang informiert Sie über Indikations- und Auffrischimpfungen, Inkubationszeiten, die Meldepflicht nach dem Infektionsschutzgesetz, die Berufskrankheiten-Verordnung sowie über das Verhalten bei Notfällen.

Werner Bils

BIOLOGISCHES WISSEN IN FRAGE UND ANTWORT, 4 BÄNDE MIT CD-ROM

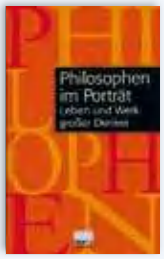
899 Aufgaben und Lösungen zu Zoologie und Botanik, Zellbiologie und Genetik, Evolution, Ökologie und Verhalten, Humanbiologie und Tierphysiologie

2012, 1056 S. m. zahlr. farb. Abb., kart., Quelle & Meyer

Bestell-Nr. 3619

früher € 79,80, jetzt nur € 39,95 (D), € 41,10 (A)

Die Vermittlung biologischen Wissens ist eine komplexe und daher schwierige Aufgabe. Aber was ist mit der Überprüfung des erlernten Stoffes? Welche Fragen sollen sinnvollerweise gestellt werden? Ganz einfach: aus der vierbändigen Reihe »Biologisches Wissen in Frage und Antwort«!



Andreas Graeser, Günter Figal, Jan Szaif u. a.

PHILOSOPHEN IM PORTRÄT

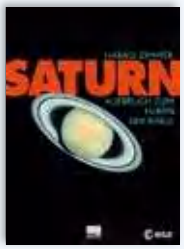
Leben und Werk großer Denker

2004, 432 S., geb., Primus

Bestell-Nr. 3623

früher € 14,90, jetzt nur € 9,99 (D), € 10,30 (A)

Der Band gliedert sich in die vier großen Epochen: Antike, Mittelalter, Neuzeit und Moderne. Jeder Epoche ist ein kurzer Beitrag vorangestellt, der einen Überblick vermittelt und die Philosophen in ihre Zeit einbettet. Vorgestellt werden im Anschluss daran Leben und Werk von 23 Philosophen.



Harro Zimmer

SATURN

Aufbruch zum Herrn der Ringe. In Zus.-Arb. mit d. ESA

2006, 144 S. m. 82 meist farb. Abb., geb., Primus

Bestell-Nr. 2137

früher € 29,90, jetzt nur € 9,99 (D), € 10,30 (A)

Der Text-Bildband, illustriert mit hervorragendem Bildmaterial der NASA und der ESA, beschreibt die spannende Erkundung des Saturns und seiner Monde bis heute und konzentriert sich dabei auf die aktuelle Cassini-Huygens-Mission. Vorgestellt werden dabei immer auch die Menschen, die die Forschungsgeschichte des Saturns mitgeschrieben haben, von Huygens bis hin zu den Protagonisten der Raumfahrtmissionen.

Für regnerische Feiertage

Robert Winston

COOLE EXPERIMENTE FÜR ZU HAUSE

2012, 144 S. m. 350 Farbabb. u. Zeichn., geb., Dorling Kindersley

Bestell-Nr. 3626

€ 14,95 (D), € 15,40 (A)

Ab 8 Jahren. Leuchtende Götterspeise, »Elefantenzahnpasta«, ein Vulkanausbruch in der Küche oder selbst gezüchtete Kristalle – dieses Buch steckt voller faszinierender Versuche, die sich leicht zu Hause umsetzen lassen, garantiert Spaß bringen und zu unglaublichen Ergebnissen führen. Mit Kurzporträts großer Wissenschaftler – die ideale Ergänzung zum Schulunterricht!

Naturwissenschaften sind alles andere als langweilig!

3-D MEMO SPACE

Entdecke die neue 3-D Memo Welt

40 Karten mit 20 Motiven aus Astronomie und Raumfahrt, Campagames

Bestell-Nr. 3345

€ 14,90 (D), € 14,90 (A)

Die Motive sind in 3-D-Lentikular Technik (ähnlich wie Wackelbilder) bearbeitet, so dass der Weltraum mittels eines wunderschönen, tiefen 3-D-Effekts spielerisch entdeckt werden kann! Motive sind u.a. Jupiter, Uranus, Saturn, der Astronaut Edwin Aldrin und das Spaceshuttle. Geeignet für bis zu 4 Spieler ab 4 Jahren.

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich

Andreas Martius

PAPIERFLIEGER DER EXTRAKLASSE, MIT CD-ROM

2012, 64 S. m. zahlr. farb. Abb., Beil.: Vorlagenbogen, geb., Christophoru

Bestell-Nr. 3539

€ 12,99 (D), € 13,40 (A)

Immer wieder ist es faszinierend, wie dieses gefaltete Stück Papier die Schwerkraft für eine Weile überwindet und sanft schwebt. Papierflieger sind aber nicht nur etwas zum Träumen, das Falten begeistert außerdem alle Konstrukteure. In dieser »Flugwerft für Profis« werden ganz besondere futuristische Modelle in einer speziellen Falttechnik gebaut, der Verhakung. So sind diese Flieger besonders stabil und flugsicher.

Besuchen Sie uns im Internet unter:
www.science-shop.de

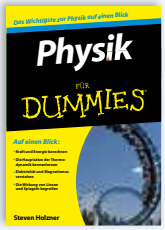
Sommerfreuden

Science-Shop.de

Neuheiten
Schnäppchen*
Science & Fun

SCIENCE-SHOP
SPEZIAL 4/2012

* Lieferung, solange Vorrat reicht



Steven Holzner

PHYSIK KOMPAKT FÜR DUMMIES

Ein Grundkurs

2012, 219 S., kart., Wiley-VCH

Bestell-Nr. 3548 € 10,– (D), € 10,30 (A)

Dieses Büchlein hilft Ihnen, wenn Sie sich einen schnellen Überblick über die Physik verschaffen wollen. Steven Holzner erklärt leicht verständlich, was Sie über Kräfte und Bewegungen, Energie, Wärme, Licht, elektrische Felder und Kernphysik unbedingt wissen sollten.

Frank Close

NEUTRINO

2012, 233 S. m. 11 Abb., geb., Spektrum

Bestell-Nr. 3546

€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Über ein rätselhaftes Teilchen und seine wachsende Bedeutung für die Astrophysik

Der Autor schildert in diesem spannenden kleinen Buch nicht nur die ersten theoretischen Hinweise auf die Existenz von Neutrinos, sondern auch den langen Kampf, solche Teilchen zu »fangen« und ihre Natur zu verstehen.

Lisa Randall

DIE VERMESSUNG DES UNIVERSUMS

Wie die Physik von morgen den letzten Geheimnissen auf der Spur ist

2012, 490 S. m. Abb., geb., Fischer

Bestell-Nr. 3496

€ 24,99 (D), € 25,70 (A)

In ihrem neuen Buch berichtet die Physikerin Lisa Randall aus den Laboren und Denkfabriken ihrer Kollegen: Welchen Fragen gehen Physiker heute nach? Welche Rolle spielen so gigantische Apparate wie der Teilchenbeschleuniger LHC am CERN? Was hat es mit der Suche nach dem Higgs-Boson auf sich? Wie hängt angewandte mit theoretischer Physik zusammen?

Lisa Randall zeichnet das Bild der gegenwärtigen Physik in all ihren Facetten und lässt ganz konkret werden, wie die moderne Grundlagenforschung funktioniert.

Monica Ramirez Basco

SCHLUSS MIT PROKRASTINIEREN

Wie Sie heute beginnen, mit dem Aufschieben aufzuhören

2012, 184 S. m. Abb. u. Tab., kart., Huber

Bestell-Nr. 3614

€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Sind Sie frustriert davon, dass Sie immer alles aufschieben?

Dr. Monica R. Basco, selbst »geheilte Prokrastiniererin« und Expertin für Kognitive Verhaltenstherapie, zeigt Ihnen mit anschaulichen Beispielen, kurzweiligen Selbsttests und praktischen Übungen, wie Sie heute mit dem Aufschieben aufhören können.

Florian Freistetter

KRAWUMM!

Ein Plädoyer für den Weltuntergang

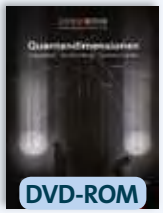
2012, 210 S. m. zahlr. Abb., geb., Ecowin

Bestell-Nr. 3497

€ 22,90 (D), € 22,90 (A)

Ob nun Planeten aufeinanderprallen, Galaxien zusammenstoßen oder gar ganze Universen kollidieren: Die Folgen sind immer dramatisch. Kollisionen bringen aber nicht nur Zerstörung. Sie stehen auch am Anfang aller Dinge, ohne sie würde es kein Leben auf der Erde geben. Sehen Sie aus sicherer Entfernung dabei zu, wie alles ineinanderkracht, was im Weltall ineinanderkrachen kann! Von Asteroideneinschlägen bis hin zu ganzen Universen, die zusammenstoßen, werden Sie die verschiedensten Kollisionen erleben und dabei feststellen, dass wir den kosmischen Katastrophen viel zu verdanken haben.

Bestellen Sie direkt: +49 6221 9126-841 @ info@science-shop.de



Mitarbeit: Stefan Heusler

QUANTENDIMENSIONEN, DVD-ROM

Doppelspalt – Verschränkung – Quantencomputer

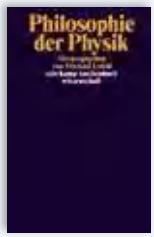
2010, in DVD-Box., für PC und Mac, Lehr-Programm gem. § 14 JuSchG., Klett, Sciencemotion

Bestell-Nr. 3552 € 29,95 (D), € 29,95 (A)

Diese ausgefuchste Lernsoftware bringt Licht in die mysteriöse Quantenwelt!

Mit den beiden Detektoren Alice und Bob begeben wir uns auf die faszinierende Reise in die Quantendimensionen von Licht. Wie lässt sich Licht beschreiben, woraus besteht es und wie verhält es sich? Auf der Suche nach Antworten nähern wir uns dem Licht auf zwei verschiedene Weisen – im Spielfilm »Schattenwelten« und anhand von 14 Lernstationen auf der U-Bahn-Linie 1, der Nonlocality Line. Diese Lernsoftware zur Quantenphysik wurde von Physikdidaktikern der Universität Münster entwickelt. Ein großer Spaß für alle Physikinteressierten und auch ideal für den Unterricht in der Oberstufe.

Besuchen Sie uns im Internet unter:
www.science-shop.de



Herausgegeben von Michael Esfeld

PHILOSOPHIE DER PHYSIK

2012, 481 S., kart., Suhrkamp

Bestell-Nr. 3621

€ 18,00 (D), € 18,50 (A)

Seit ihren Anfängen bei den Vorsokratikern sind Philosophie und Physik eng miteinander verbunden. Dieser Band soll die Vielfalt und Lebendigkeit der philosophischen Auseinandersetzung mit der Physik im deutschsprachigen Raum heute aufzeigen.

BRESSER VISIOMAR MICROSET 40X-1024X

Mikroskop-Set mit USB-Anschluss

Kunststoffkoffer, Staubschutzhülle, 230-V-Netzteil (5,5 V / 200 mA), Präparatebox mit 5 Dauerpräparaten; Objektträgern und Deckgläschen, Präparierbesteck, Garnelenbrutanlage, MikrOkular II mit Bildbearbeitungssoftware, Meade

Bestell-Nr. 3618

€ 89,– (D), € 89,– (A)

Hochwertiges Schülermikroskop mit Barlow-Linsen-Zoom-System und PC-Okular

Ausgestattet mit einer Barlow-Linse, die die Vergrößerung des Mikroskops bis zu 1,6-fach steigert, einem MikrOkular I (PC-Okular mit 640 x 480 Pixel Auflösung), Ulead-Photo-Explorer-Bildbearbeitungssoftware, USB-Verbindungskabel, 2 optischen Okulare und Netzadapter sowie weiterem nützlichen Starter-Zubehör wie: 5 Dauerpräparate, 10 Objektträger, 20 Deckgläser und Staubschutzhülle. Beobachtungsobjekte: Kleinorganismen, Insekten, Pflanzen, kleinere Mineralien.

Harald Fritzsch

MIKROKOSMOS

Die Welt der kleinsten Teilchen

2012, 191 S. m. Abb., geb., Piper

Bestell-Nr. 3620

€ 19,99 (D), € 20,60 (A)

Um zu verstehen, warum alles, was uns umgibt, existiert, müssen wir unser Auge vom Riesiggroßen auf das Winzigkleine lenken. Was die moderne Teilchenphysik ist und wo die letzten Fragen offenbleiben – das alles erklärt Harald Fritzsch in leichter Sprache und mit feinem Witz.

Bequem bestellen:

- **→ direkt bei** www.science-shop.de
- **→ per E-Mail** info@science-shop.de
- **→ telefonisch** +49 6221 9126-841
- **→ per Fax** +49 711 7252-366
- **→ per Post** Postfach 810680 • 70523 Stuttgart

Für Bestellungen außerhalb Deutschlands und Österreichs berechnen wir € 3,50 Versandkosten. Alle Preise inkl. Umsatzsteuer. Preise unter Vorbehalt. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH

Sommerfreuden

Bas Kast

ICH WEISS NICHT, WAS ICH WOLLEN SOLL

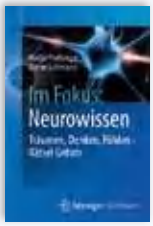
Warum wir uns so schwer entscheiden können und wo das Glück zu finden ist

2012, 284 S. m. Abb., geb., Fischer

Bestell-Nr. 3613

€ 18,99 (D), € 19,60 (A)

Wir haben alle Chancen der Welt, wir können leben, mit wem wir wollen, wo wir wollen und wie wir wollen, wir können unseren Neigungen nachgehen und an der Erfüllung unserer Wünsche arbeiten – und trotzdem tun sich viele von uns so schwer mit der Liebe und dem Leben. Bas Kast fügt zusammen, was unterschiedlichste wissenschaftliche Disziplinen – wie Psychologie, Hirnforschung, Politik- und Wirtschaftswissenschaften – zur Qual der Wahl und unserer rasenden Wohlstandsgesellschaft herausgefunden haben. Denn erstmals lassen sich die Fragen nach Glück und Zufriedenheit empirisch beantworten. Ein Buch voller überraschender Analysen und Einsichten über uns und den Zustand der Welt, in der wir leben.



Nadja Podbregar, Dieter Lohmann

IM FOKUS: NEUROWISSEN

Träumen, Denken, Fühlen – Rätsel Gehirn. Naturwissenschaften im Fokus

2012, 140 S., 20 Farbabb., geb., Springer-Spektrum

Bestell-Nr. 3550

€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Können wir im Schlaf lernen? Wie weit reicht der Einfluss der Hormone? Und was bestimmt, ob wir hochbegabt oder nur Durchschnitt sind? Im Zentrum all dieser Fragen steht unser Gehirn, die Schaltzentrale unserer Persönlichkeit und unseres Menschseins.

In den letzten Jahren sind Neurowissenschaftler immer tiefer in die Struktur und Physiologie des Gehirns vorgedrungen. Doch noch sind längst nicht alle Mitspieler im Konzert unseres Bewusstseins bekannt. Dieses Buch nimmt Sie mit auf eine Erkundungsreise zu faszinierenden, rätselhaften und beeindruckenden Phänomenen unseres Denkens, Fühlens und Bewusstseins.

Carsten Könneker

WISSENSCHAFT KOMMUNIZIEREN

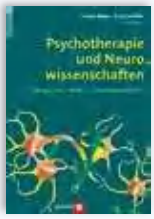
Ein Handbuch mit vielen praktischen Beispielen

2012, XII, 219 S. m. 30 SW- u. 50 Farbabb., kart., Wiley-VCH

Bestell-Nr. 3612

€ 24,90 (D), € 25,60 (A)

Dieses Buch ist eine unverzichtbare Hilfe für alle Naturwissenschaftler und Studenten, die ihre Arbeit gegenüber verschiedenen Zielgruppen besser kommunizieren wollen; seien dies Laien, Medien, Drittmittelgeber oder Kollegen anderer Fachbereiche. Es erklärt die gute Praxis von Meldungen, Pressemeldungen, Artikeln, Kommentaren, Vorträgen, Drittmittelanträgen, Weblogs usw. anhand von vielen Beispielen aus der medialen Praxis.



Heinz Böker, Erich Seifritz (Hg.)

PSYCHOTHERAPIE UND NEUROWISSENSCHAFTEN

Integration – Kritik – Zukunftsaussichten

2012, 656 S. m. z. Tl. farb. Abb. u. Tab., geb., Huber

Bestell-Nr. 3615 € 64,95 (D), € 66,80 (A)

Die beeindruckenden Erkenntnisse der Neurowissenschaften ermöglichen einen vertieften Einblick in das Gehirn und beleuchten insbesondere zunehmend die Funktionsweise der Psychotherapie. Dieses Buch vermittelt einen Überblick über den aktuellen Dialog zwischen Psychotherapie und Neurowissenschaften. International anerkannte Experten stellen den Stand der bisherigen Forschung zu verschiedenen Psychotherapieverfahren vor und überprüfen die Ergebnisse im Hinblick auf ihre klinische Relevanz.

Bestellen Sie direkt: +49 6221 9126-841 @ info@science-shop.de

Michael Stocker, Sebastian Meyer

WILDTIERE

Hausfreunde und Störenfriede

2012, 352 S. m. 120 Farbfotos u. 100 Zeichn., geb., Haupt

Bestell-Nr. 3522

€ 29,90 (D), € 30,80 (A)

Dieses Buch lädt ein auf einen Rundgang durch Haus und Garten – aufs Dach und auf den Dachboden, ans Fenster und auf den Balkon, an die Fassade und in Innenräume und Keller. Mit Tierporträts und Tipps fürs Beobachten bietet es spannendes Wissen rund um die Natur in der Nähe.

Außerdem Tipps und Anleitungen: mit Bauplänen für Nisthilfen, Wissen fürs Bauen und Renovieren, sowie Vorschlägen fürs Entschärfen von Tierfallen.

Stefan Korth, Bernd Koch

STARS AM NACHTHIMMEL

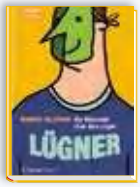
Der sichere Wegweiser zu den 50 schönsten Himmelsobjekten

2., überarb. Aufl. 2012, 151 S. m. zahlr., meist farb. Abb., Kosmos

Bestell-Nr. 3499

€ 16,99 (D), € 17,50 (A)

Sternhaufen, Galaxien und Gasnebel: Mit dieser Anleitung fällt es leicht, die Stars am Nachthimmel zu entdecken. Ob mit bloßem Auge, Fernglas oder Teleskop – hier finden Sie den Weg zu den Attraktionen des Universums. Und das geht ganz einfach per »Starhopping«: keine Koordinaten, kein Computer – dieses Buch genügt. Für jedes Objekt gibt es eine eigene, speziell entwickelte Sternkarte, eine genaue Wegbeschreibung und ein wunderschönes Foto. So wird die Beobachtungsnacht zum unvergesslichen Erlebnis!



Robert Feldman

LÜGNER

Die Wahrheit über das Lügen

2012, 370 S., geb., Spektrum

Bestell-Nr. 3503

€ 24,95 (D), € 25,70 (A)

Wann haben Sie das letzte Mal gelogen? Wie die psychologische Forschung zeigt, lügen sich fremde Menschen während eines zehnminütigen Gesprächs im Mittel dreimal an. Täuschung und Unehrlichkeit spielen eine erstaunlich große und entscheidende Rolle in unserer Gesellschaft. Robert Feldman enthüllt im vorliegenden Buch die ganze Wahrheit über das Lügen.

Stefan Ineichen, Bernhard Klausnitzer, Max Ruckstuhl

STADTFAUNA

600 Tierarten unserer Städte

2012, 434 S. m. 600 Farbfotos, geb., Haupt

Bestell-Nr. 3521

€ 29,90 (D), € 30,80 (A)

Von der Laus bis zum Wildschwein – 600 tierische Stadtbewohner im Porträt!

Städte sind nicht nur von Menschen bewohnt, sondern bieten auch einer großen Vielfalt von Tieren Wohnraum und Nahrung. Diesen erstaunlichen Artenreichtum macht die »Stadtfauna« sichtbar. Die allesamt mit Farbfotos illustrierten, von Spezialisten verfassten Artenporträts geben Auskunft über Lebensweise und Verbreitung der Tiere, die städtische Gärten und Gebäude, Bahnareale und Blumenwiesen, Gewässer und Stadtwälder besiedeln. Das hier vereinigte Wissen stellt einen einzigartigen Überblick über die städtische Fauna in Mitteleuropa dar.

David J. Linden

HIGH

Woher die guten Gefühle kommen

2012, 272 S. m. 25 Abb. , geb., C.H.Beck

Bestell-Nr. 3553

€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Was hat ein köstliches Essen mit einem Dauerlauf zu tun? Oder eine großzügige Spende mit dem Nervenkitzel beim Roulette? Anhand vieler anschaulicher Beispiele klärt uns der Neurowissenschaftler David J. Linden darüber auf, was in unserem Gehirn geschieht, wenn wir Freude, Vergnügen und Lust empfinden. Dabei macht er eine erstaunliche Entdeckung: Bei all diesen Tätigkeiten werden neuronale Signale ausgesendet, die in derselben Hirnregion zusammenlaufen, im so genannten Belohnungszentrum. Doch dieses Wohlfühlzentrum hat auch eine dunkle Seite. Denn künstliche Stimulanzien wie Nikotin, Alkohol oder Drogen nutzen die Vorgänge im Belohnungszentrum ebenfalls. Die Forschungsergebnisse sprechen dafür, dass hier die Süchte mit all ihren negativen Auswirkungen entstehen.

DAS BAUMEISTERSPIEL KLASSIK

Unendliche Vielfalt

Format 12,5 x 12,5 cm, blaue Steine mit grauer Platte aus Recyclingkunststoff, Logika Spiele

Bestell-Nr. 3616 **€ 16,– (D),** € 16,– (A)

Das Baumeisterspiel lässt sich in seiner handlichen und ansprechenden Aufmachung ein ganzes Leben in immer wieder neuen Variationen spielen. Acht verschieden gestaltete Bausteine, die jeder für sich aus mehreren Einzelwürfeln bestehen, werden auf einer Grundplatte zu den unterschiedlichsten Formen zusammengebaut. Mit seiner unerschöpflichen Vielfalt weckt es den Spielspaß und schult sozusagen spielerisch Gedächtnis, Konzentration, Geduld, Intelligenz und erst recht räumliches Vorstellungsvermögen, Fantasie, Intuition, laterales Denken. Für 1 Spieler.

Bestellen Sie direkt: +49 6221 9126-841 @ info@science-shop.de

DIE KNOTENBOX

50 Knoten-Klassiker für Freizeit, Sport und Alltag

Mit 2 Schnüren zum Üben in Metallbox, moses

Bestell-Nr. 3617 **€ 12,95 (D),** € 12,95 (A)

Warum hat es der Seemann so gut? Richtig – er kann in jeder Lebenslage den richtigen Knoten knüpfen. Aber wir Landratten müssen nicht verzagen: Mit der Knotenbox lernen wir 50 praktische und bewährte Knoten mit Hilfe der 50 handlichen Karten und der beiliegenden 2 Schnüre. Mit anschaulichen Schritt-für-Schritt-Abbildungen und wissenswerten Sachinformationen rund um Entstehung, Gebrauch und Anwendung der Knoten.

Besuchen Sie uns im Internet unter:
www.science-shop.de

VERSCHÄTZT NOCH MAL!

Sinnloses Wissen, nutzlose Fakten und verrückte Fragen!

2012, 106 Fragekarten, ab 12 Jahren, Kylskapspoesie

Bestell-Nr. 3566

€ 21,95 (D), € 21,95 (A)

Ein fesselndes und unterhaltsames Spiel mit mehr als 300 interessanten und bizzaren Fragen. Dabei geht es nicht darum, die korrekte Antwort zu wissen, sondern vielmehr darum, der richtigen Antwort durch Raten oder Schätzen so nahe wie möglich zu kommen.

Armin Täubner

DAS GROSSE FRÖBELBUCH

Kreative Bastelideen aus Papier nach Friedrich Fröbel

2012, 128 S. m. zahlr. farb. Abb. u. Faltzeichn., geb., Frech

Bestell-Nr. 3627 **€ 14,99 (D),** € 15,50 (A)

Basteln mit Papier fördert in besonderem Maße Ästhetik und Kreativität, mathematische Grundkenntnisse und Feinmotorik. Eine Vielzahl an kreativen Papierarbeiten nach Friedrich Fröbel.

Ivan Moscovich

1000 DENKSPIELE

aus Wissenschaft, Natur & Technik

2012, 431 S. m. 1200 Abb., kart., Ullmann

Bestell-Nr. 3628 **€ 9,99 (D),** € 10,30 (A)

Textaufgaben und Puzzlespiele aus den Bereichen Mathematik, Physik, logisches Denken und räumliche Vorstellungskraft. Durch Knobelaufgaben aus Alltagssituationen werden naturwissenschaftliche Zusammenhänge spielerisch erklärt. »1000 Denkspiele« ist ein Knobelspaß von leicht bis schwierig für Jugendliche und Erwachsene.

Hanno Depner

KANT FÜR DIE HAND

Die »Kritik der reinen Vernunft« zum Basteln & Begreifen. Mit Anleitung und 12 Bogen Bausatz

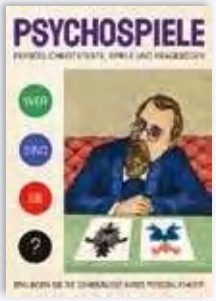
2011, 71 S. m. farb. Abb., 12 Bastelbogen, geb., Knaus

Bestell-Nr. 3629 **€ 19,99 (D),** € 20,60 (A)

Der Bausatz »Kant für die Hand« des Philosophen Hanno Depner ermöglicht einen überraschenden und einzigartigen Zugang zu einem Hauptwerk der Geistesgeschichte. In 3 Stunden Bastelzeit wird Erkenntnis zum Abenteuer und ein Buch auf ganz neue Weise zur besten aller möglichen Beschäftigungen.

Ein Video zum Titel finden Sie unter
www.science-shop.de/artikel/1066936

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich



PSYCHOSPIELE

Persönlichkeitstests, Spiele und Fragebögen. Wer sind Sie? Erkunden Sie die Geheimnisse Ihrer Persönlichkeit!

2012, in Box, Kunstmann

Bestell-Nr. 3556

€ 24,90 (D), € 24,90 (A)

Was für ein Mensch sind Sie?

Eine außergewöhnlich schön gestaltete Sammlung von Psychospielen, Persönlichkeitstests und Fragebögen– allesamt von Psychologen entwickelt –, die Ihnen die verborgenen Seiten Ihrer Persönlichkeit offenbaren. Die Karten sind angereichert mit informativen und anregenden Texten zu den einzelnen Tests und Spielen, ihren Grundlagen und Ergebnissen. Keine Angst: Mit diesen Psychospielen kann Ihnen nichts Schlimmeres passieren, als dass sich Ihr Leben ändert (zum Besseren natürlich).

BESTELLCOUPON

Gleich bestellen! Einfach Bestellcoupon kopieren und faxen an: 0711/7252-366 oder ausschneiden und per Post schicken: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH • Science-Shop • Postfach 810680 D-70523 Stuttgart. Schicken Sie eine E-Mail an: info@science-shop.de oder rufen Sie an unter: 06221/9126-841.

JA, ich bestelle und habe 14 Tage volles Rückgaberecht

Anzahl	Bestell-Nr.	Titel	€

Besteller-Anschrift:

Name/Vorname

Straße/Hausnummer

Datum/Unterschrift

E-Mail-Adresse

☐ **Zahlung per Bankeinzug**

Geldinstitut/Ort

Konto-Nr.

BLZ

Datum/Unterschrift

☐ **Zahlung per Rechnung**

PLZ/Wohnort

Kunden-Nr. (falls vorhanden)

SOM12COUP

NASA, GSFC / MODIS LAND RAPID RESPONSE TEAM, JACQUES DESCLOITRES (HTTP://RAPIDFIRE.SCI.GSFC.NASA.GOV)

Vom Winde verweht: Eine Staubfahne aus der Sahara breitet sich nach Westen aus und driftet über die Kanarischen Inseln.

INTERKONTINENTALE STAUBDRIFT

Von Afrika zum Amazonas

Riesige Staubfahnen wehen von Kontinent zu Kontinent. Sie düngen die Ozeane und halten gewaltige Ökosysteme am Leben. Ihr Wirken ist zudem eng verzahnt mit dem Klimawandel.

Von Jeffrey Bartholet

Die Bodélé-Depression ist eine Bodensenke in der Republik Tschad. Sie hat etwa die Größe Kaliforniens und liegt am südlichen Rand der Sahara, südwestlich des Tibesti-Gebirges und nördlich des Tschadsees. Es ist eine öde, einsame Gegend. Wind pfeift durch die nahe gelegenen Berge und weht mit hoher Geschwindigkeit in die ausgetrocknete Senke hinunter. Einst wogte hier ein gewaltiger Süßwassersee, von dem nicht viel mehr geblieben ist als eine mickrige Pfütze.

Wenn der Wind über den ehemaligen Seegrund fegt, von dem große Teile schon seit Jahrtausenden trockenliegen, wirbelt er riesige weiße Staubwolken auf. Sie bewegen sich himmelwärts und gehen dann auf große Reise rund um den Globus. Wohin und unter welchen Umständen, das würden Atmosphärenforscher gern besser verstehen. Noch vor wenigen Jahrzehnten widmeten sie dem natürlichen Staub kaum Aufmerksamkeit, abgesehen davon, dass sie ihn zu Hause mit dem Lappen aufwischten und sich über Flusen in den Ecken ärgerten. Viel interessanter erschienen ihnen menschengemachte Schadstoffe, die sich in der Luft verteilen. Nur wenigen Wissenschaftlern war klar, dass ständig Millionen Tonnen aufgewirbelter Bodenpartikel rund um den Erdball jagen und dabei das Klima beeinflussen, die Ozeane düngen und den Regenwald am Amazonas mit Nährstoffen versorgen – sowie zahlreiche andere Gebiete auch.

Joseph M. Prospero gilt als Pionier der Staubforschung. Der emeritierte Professor für Meeres- und Atmosphärenchemie an der University of Miami (USA) erinnert sich noch, wie skeptisch seine Kollegen reagierten, als er in den 1960er und 1970er Jahren mehrere Fachartikel veröffentlichte mit der These, dass gewaltige Staubmengen von Afrika über den Atlantik nach Nord- und Südamerika driften. »Die Leute machten sich damals über das Thema lustig«, sagt Prospero. Etliche hätten bezweifelt, dass es sich um ein ernst zu nehmendes Forschungsgebiet handle.

So war es für ihn zunächst ein einsames Unterfangen, entlegene Staubmessstationen auf der Insel Barbados und anderswo zu überwachen und die Körnchen zu untersuchen, die er in Luftfiltern aufgefangen hatte. Später nahm das Interesse an seiner Forschung allerdings zu – unter anderem deshalb, weil Satellitenaufnahmen immer besser aufgelöst zeigten, was Prospero und andere beschrieben hatten: gigantische Staubfahnen mit mehreren hundert Kilometer Länge, die von Afrika fortgeblasen werden und auf der anderen Seite des Atlantiks wieder zu Boden sinken. Zugleich rückte der Klimawandel in den Fokus, und es zeichnete sich ab, dass

natürlicher Staub in der Atmosphäre einen maßgeblichen Einfluss auf die globale Durchschnittstemperatur hat.

»Heute erscheinen so viele wissenschaftliche Aufsätze zum Thema, dass es unmöglich ist, sie alle zu lesen«, sagt Prospero. Zwischen den frühen 1970er Jahren und der Jahrtausendwende verdoppelte sich alle vier Jahre die Zahl der Fachartikel, die von Saharastaub handeln. Was sagen uns all diese Untersuchungen? Zum Beispiel, dass sich Vorgänge in einer bestimmten Region intensiv auf Gebiete auswirken können, die tausende Kilometer entfernt liegen. Doch viele Details sind dabei noch unverstanden. »Sobald wir die Antwort auf eine unserer Fragen gefunden haben, tauchen sofort drei neue Fragen auf«, sagt Robert J. Swap, Professor für Umweltwissenschaften an der University of Virginia (USA), der über afrikanischen Staub am Amazonas geforscht hat.

Von der eingangs beschriebenen Bodélé-Depression, aber auch aus der weitläufigeren Sahara und der nahe gelegenen Sahelzone treibt der Staub über den Atlantik nach Amerika. Er braucht etwa eine Woche oder länger für die Reise. Jeden Sommer gehen riesige Mengen davon über dem Süden und Osten der USA nieder; sie machen beispielsweise in Florida bis zu 80 Prozent aller niedersinkenden Staubkörnchen aus. Wenn die Bewohner Miamis nach einem Regenguss ihre Autos von einer rötlichen Schmutzschicht befreien, wischen sie einen Gruß aus dem fernen Afrika weg. Und Spaziergänger, die über die Inseln der Bahamas oder Florida Keys wandern, laufen im Wesentlichen über afrikanischen Boden.

Weltweit setzen sich schätzungsweise zwei Milliarden Tonnen Bodenpartikel pro Jahr mit dem Wind in Bewegung. Mehr als die Hälfte davon stammt aus den Wüsten und Trockengebieten Afrikas. Chinesischer Staub wird nach Hawaii und in den Westen Nordamerikas geblasen; von Patagonien aus treiben die Körnchen in die Antarktis. Ein Großteil des Staubs, der in Grönland niedergeht, kommt aus Asien – doch als eine jahrelange Dürre in den 1930er Jahren die Great Plains (Großen Ebenen) Nordamerikas vielerorts in eine riesige »Staubschüssel« verwandelte, fanden die Partikel von dort offenbar ebenfalls ihren Weg bis zu den grönländischen Gletschern.

Ein großer Teil des aus Afrika verwehten Staubs driftet mit den Passatwinden 6400 Kilometer westwärts über den Atlantik. Etwa 40 Millionen Tonnen, angereichert mit lebenswichtigen Mineralen wie Eisen und Phosphor, rieseln einer Schätzung zufolge jährlich über dem Amazonas-Regenwald nieder. Die Hälfte davon dürfte aus der Bodélé-Depression stammen.

Dieser gigantische Materialtransport hinterlässt Spuren. In der Bodélé-Depression hat der Wind bereits zahlreiche Bodenschichten abgetragen. Die nötige Luftgeschwindigkeit, um die Körnchen in Bewegung zu setzen, hängt von den Verhältnissen an der Bodenoberfläche und den klimatischen Bedingungen ab. Meist liegt sie zwischen vier und zwölf Meter pro Sekunde. Sobald die Partikel sich lösen und über den Erdboden zu hüpfen beginnen, schlagen sie weitere los. Die kleinsten treiben bald aufwärts. In der Luft vermischen sie sich zunächst mit zahllosen weiteren Körnchen aus der Bodélé-Senke, später auch mit aufgewirbeltem Material aus anderen Teilen Afrikas. Schließlich werden sie zum Teil einer gewaltigen Staubfahne, die über den Atlantik zieht.

Eine Ursache – verschiedene Wirkungen

Befindet sich das Material erst einmal in der Luft, beeinflusst es auch das Klima der Erde. Es verschluckt bestimmte Wellenlängen der Sonnenstrahlung, was die Atmosphäre erwärmt. Andere Wellenlängen reflektiert es in den Weltraum, was die Abkühlung fördert. In welchem Verhältnis die absorbierte zur reflektierten Energie steht, hängt von der chemischen Zusammensetzung und Korngröße des Staubs ab sowie vom Spektrum der Strahlung. Meist werden die kurzen, aus dem Weltraum kommenden Wellen zurückgeworfen und die langen, von der Erdoberfläche kommenden absorbiert. Wenn die Staubkörnchen mit Ruß vermischt sind, verschlucken sie noch deutlich mehr langwellige Strahlung.

Driftet der Staub über dunklen Gebieten, etwa über Ozeanen, reflektiert er Licht, das andernfalls absorbiert worden wäre, woraus eine Abkühlung resultiert. Zieht er hingegen über helle Areale wie Eis- oder Sandfelder, hat er eher einen wärmenden Effekt, da er sie verdunkelt und somit die Absorption erhöht. Aus demselben Grund steigen die Temperaturen auch, wenn die feinen Partikel auf sonnenbeschienene Schnee- oder Eisflächen fallen. Viele Wissenschaftler glauben dennoch, dass der atmosphärische Staub unterm Strich den Planeten abkühlt. Allerdings reicht dies bei Weitem nicht, um die globale Erwärmung durch Treibhausgase auszugleichen.

Durch die Luft transportierter Staub beeinflusst das Klima auch indirekt. Zum Beispiel spielt er eine wichtige Rolle bei der Wolkenbildung. Feuchtigkeit in der Luft kondensiert nicht von selbst, sondern muss sich hierfür an Partikel anlagern. Die Wissenschaftler sind uneins, in welchem Ausmaß Staubkörner als Kondensationskeime dienen. Natalie Mahowald, Professorin an der Cornell University und Entwicklerin von Atmosphärenmodellen, zeigt sich überzeugt, dass sowohl Wasser als auch Eis an den Körnchen kondensieren. Paul Ginoux, der Klimamodelle für die Wetter- und Ozeanografiebehörde der USA erstellt, ist vorsichtiger. Er hält Staub-

AUF EINEN BLICK

GETRÜBTE SICHT

1 Jedes Jahr werden weltweit etwa **zwei Milliarden Tonnen Staub** vom Wind aufgewirbelt und dann von Kontinent zu Kontinent getrieben. Mehr als die Hälfte stammt aus Afrika.

2 Der Staub beeinflusst das **Weltklima** sowie den **Nährstoffgehalt von Ozeanen und Regenwäldern**. Das hat enorme Auswirkungen auf Planktonblüten im Meer und die Artenvielfalt an Land.

3 Trotz intensiver Forschungen verstehen Wissenschaftler das komplizierte Wechselspiel zwischen dem Staub und der **Atmosphäre** bisher nur unzureichend.

BEIDE FOTOS: DESERT RESEARCH INSTITUTE (WWW.DRI.EDU)

Wissenschaftler entnehmen Eisbohrkerne in Grönland. Später werden sie die Konzentrationen bestimmter Elemente darin messen, etwa von Aluminium und Cer. Diese Stoffe kommen in Staubkörnchen vor, die sich über Jahrhunderte hinweg in Eis und Schnee abgesetzt haben (rechts). Ziel der Untersuchungen ist es, den früheren Staubgehalt der Atmosphäre zu rekonstruieren.

partikel ebenfalls für wichtige Keime bei der Eisbildung. Andererseits meint er, Wasser lagere sich nur an Körnchen an, die Sulfate enthielten – wobei diese Schwefelverbindungen hauptsächlich aus menschengemachter Luftverschmutzung stammten.

In einem Punkt stimmen Mahowald und Ginoux überein: Unser Wissen über die Wolkenbildung ist extrem lückenhaft (siehe SdW 7/2011, S. 80). Große Mengen winziger, in der Atmosphäre treibender Partikel können zahlreiche Wassertropfen entstehen lassen. Da diese aber sehr klein sind, fallen sie nur mit relativ geringer Wahrscheinlichkeit als Regen zu Boden. Wolken aus kleinen Tropfen sind zudem heller als solche aus großen und streuen deshalb mehr Strahlung in den Weltraum zurück. Falls die Körnchen, an denen das Wasser kondensiert, jedoch Wärme absorbieren, verdunstet die sie umgebende Flüssigkeit schneller und die Wolken lösen sich rascher auf. »Staub kann die Niederschlagswahrscheinlichkeit erhöhen oder senken, abhängig davon, was in der Atmosphäre insgesamt geschieht«, sagt Mahowald. Selbst die besten Computersimulationen könnten hiervon kein vollständiges Bild liefern.

Wolken haben einen erheblichen Einfluss auf das Weltklima, denn stets ist die Erdoberfläche zu etwa 60 Prozent von ihnen bedeckt. Kleine Veränderungen bei ihrer Entstehungsrate und ihren Eigenschaften könnten das Klima dramatisch beeinflussen. Nun driftete Staub allerdings während der gesamten Erdgeschichte um den Planeten. Warum sollte er heute andere Auswirkungen haben als zuvor? Etwa deshalb, weil sich in vielen Gebieten derzeit mehr Staub in Bewegung setzt als früher – das zumindest vermutet Mahowald. »Es scheint so, als habe sich die Staubmenge im 20. Jahrhundert über großen Teilen der Erdoberfläche verdoppelt«, sagt die Meteorologin. »Wir wissen nicht genau, wie es dazu kam, aber menschliche Aktivitäten könnten eine wichtige Ursache sein.«

Joseph R. McConnell vom Desert Research Institute in Reno, Nevada (USA), ist einer der Wissenschaftler, die sich mit dieser Frage befassen. Er analysiert Staubkörnchen, die im grönländischen und antarktischen Eis eingeschlossen sind. Hierfür entnimmt er zunächst Eisbohrkerne. Sie sind zwischen 20 Meter und drei Kilometer lang, je nachdem, wie weit der Zeitraum zurückliegt, über den McConnell Informationen gewinnen möchte. In seinem Labor misst er mit hochauflösenden Massenspektrometern die Konzentrationen bestimmter Elemente im Eis, etwa von Aluminium und Seltenen Erden wie Cer. Letztere kommen in Bodenstaub vor, aber nicht in Meersalz, Industrieabgasen, vulkanischen Emissionen oder Rauchfahnen von Waldbränden.

McConnell versucht dann zu ermitteln, wie stark die atmosphärischen Staubkonzentrationen in der Vergangenheit schwankten, und herauszufinden, aus welchem Grund sie das taten. Seine Erkenntnisse deuten etwa darauf hin, dass im frühen 20. Jahrhundert, als in Patagonien die Schafwirtschaft ausgeweitet wurde und vermehrt Wüsten entstanden, sich der Staubeintrag in die Antarktis verdoppelte. Es liegt nahe, dies in einen ursächlichen Zusammenhang zu bringen: Die übermäßige Landnutzung führte zur Wüstenbildung, wodurch mehr Bodenmaterial aufwirbelte, das über große Distanzen verweht wurde. McConnell betont jedoch,

dass die zu Grunde liegenden Wechselwirkungen noch nicht hinreichend genau verstanden seien, um solche Schlüsse ziehen zu können.

Möglicherweise erhöhen steigende Temperaturen den Staubgehalt in der Atmosphäre, indem sie Böden austrocknen lassen und so zur vermehrten Wüstenbildung beitragen. Das scheint aber nur ein kurzfristiger Effekt zu sein; über längere Zeiträume hinweg gehen hohe atmosphärische Staubkonzentrationen offenbar mit einer Abkühlung einher. So zeigen McConnells Ergebnisse, dass zwischen dem 10. und 13. Jahrhundert – einer Periode moderater Erwärmung und stärkerer Niederschläge im Nordatlantik – weniger Staub in die Antartis gelangte. Zwischen dem 13. und dem 19. Jahrhundert hingegen, als die Durchschnittstemperaturen sanken und weniger Niederschläge fielen, setzte sich mehr Staub rund um den Südpol ab. Im Zentrum Grönlands wiederum zeigen die Eisbohrkerne eine zunehmende Staubkonzentration über drei Jahrhunderte hinweg bis in die 1930er Jahre hinein, gefolgt von einem Rückgang (siehe Kasten unten).

Aufgewirbelte Bodenpartikel beeinflussen jedoch nicht nur die Atmosphäre, sie wirken auch als Dünger, der sich in gewaltigen Mengen über Ozeane und Länder ergießt. Bei ihrer Drift nach Westen fallen viele Staubkörnchen in den Atlantik. Sie tragen Eisen ins Meerwasser ein und regen dadurch das Wachstum von Phytoplankton an. Dieses nimmt Kohlendioxid aus der Atmosphäre auf und wandelt es fotosynthetisch in Biomasse um. Wenn die Phytoplanktonorganismen absterben, sinken sie in die Tiefe und entfernen den gebundenen Kohlenstoff für Jahrhunderte aus der Atmosphäre.

Die Ozeane enthalten fast 85 Prozent des irdischen Kohlenstoffs, der nicht in Gesteinen gebunden ist. Damit erweist sich das Phytoplankton als einer der wichtigsten Akteure im Kohlenstoffkreislauf. Große Teile der Weltmeere enthalten zwar reichlich Stickstoff und Phosphor, aber nur wenig Eisen, was das Planktonwachstum einschränkt. Diese Erkenntnisse stachelten manche Wissenschaftler zu ehrgeizigen Geoengineering-Träumen an. Viele dachten etwa so: Die Weiten der südlichen Ozeane und des Nordwestpazifiks sind nährstoffreich, bringen aber nur bescheidene Planktonblüten hervor. Hier brauche man nur reichlich Eisen ins Meer zu kippen, und schon würde sich das Phytoplankton enorm vermehren, Unmengen Kohlendioxid binden und schließlich damit zum Ozeangrund sinken. Eine einfache Idee, die auf den ersten Blick verspricht, den Gehalt an Treibhausgasen in der Atmosphäre rasch zu senken.

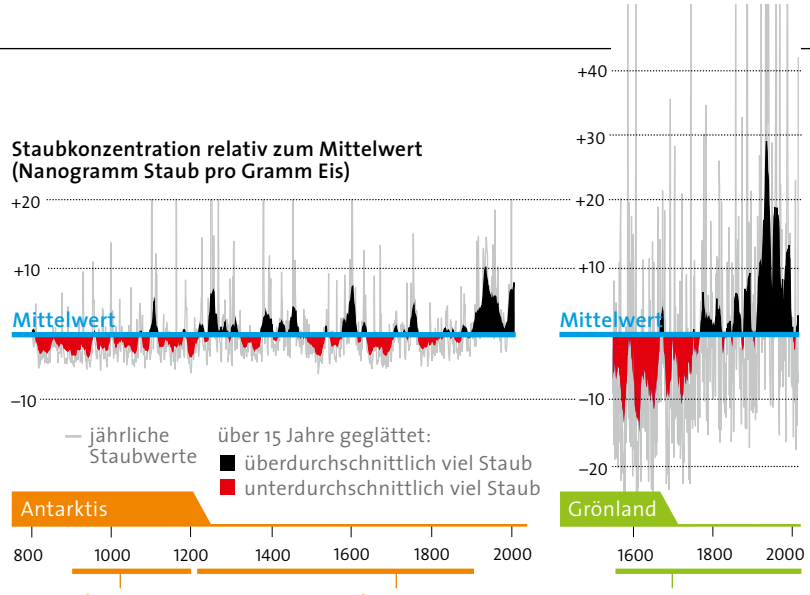
Eingriff mit unabwägbaren Folgen

Es dauerte jedoch nicht lange, bis man die Gefahren eines solchen Vorgehens erkannte. Es können zahlreiche unbeabsichtigte Folgen eintreten, etwa eine drastisch veränderte Verteilung der Mikroorganismen-Spezies entlang der Wassersäule. Das ist nicht zwangsläufig schlimm, doch die Auswirkungen sind unvorhersehbar. Neue Ökosysteme erweisen sich oft als weniger vielfältig und produktiv als diejenigen, die sie ersetzt haben. Zudem besteht die Gefahr, dass die Planktonwolken, die sich nach der Eisendüngung bilden, nicht nur Kohlendioxid in die Tiefe ziehen, sondern auch Phosphor und Stickstoff. Diese Nährstoffe stünden im Meerwasser dann möglicherweise nicht mehr ausreichend zur Verfügung.

Es gibt noch weitere Argumente gegen die künstliche Düngung der Ozeane. Die Menge an Eisen, die mit dem afrikanischen Staub ins Meereswasser gelangt, kann stark variieren. Säuren, die etwa bei der Verbrennung von Biomasse und anderen organischen Stoffen entstehen, können mit den

Spuren der Vergangenheit

Auf den Eisschilden Grönlands und der Antarktis setzen sich ständig Staubpartikel ab, die vorher mitunter tausende Kilometer gedriftet sind. Wenn später eine neue Eisschicht auf dem Schild entsteht, werden die Partikel eingeschlossen. Bohrkerne, die tief ins Eis hineinreichen, erlauben es, in dessen Schichten zu lesen wie in einem Klimaarchiv. Anhand solcher Kerne können Forscher den Staubgehalt der Atmosphäre in zurückliegenden Jahrhunderten rekonstruieren. Kühle Perioden scheinen mit mehr Staub in der Atmosphäre einherzugehen. Aber auch andere Effekte spielen eine Rolle, etwa eine veränderte Landnutzung.



10. bis 13. Jahrhundert
Mittelalterliche Warmzeit: moderate Erwärmung, stärkere Niederschläge in der Nordatlantikregion, niedriger Staubgehalt

13. bis 19. Jahrhundert
Moderate Abkühlung, weniger Niederschläge, höherer und stärker schwankender Staubgehalt, »Kleine Eiszeit«

1550 – 2010
Trends im Staubeintrag hängen wahrscheinlich mit veränderter Landnutzung und Klimaerwärmung zusammen.

JEN CHRISTIANSEN, NACH: JOSEPH R. MCCONNELL, DESERT RESEARCH INSTITUTE / ZOE COURVILLE, COLD REGIONS RESEARCH AND ENGINEERING LABORATORY / NORWEGIAN-AMERICAN SCIENTIFIC TRAVERSE OF EAST ANTARCTICA RESEARCH TEAM

Partikeln reagieren und dadurch das Eisen wasserlöslicher machen. Indem wir also Treibstoffe und Abfall verbrennen, tragen wir bereits dazu bei, dass die Menge des verfügbaren Eisens in den Meeren steigt. »Sie dürfte sich durch menschliche Aktivitäten verdoppelt haben«, schätzt Mahowald. »Außerdem gibt es viel mehr sedimentäres Eisen in den Ozeanen als früher angenommen. Überraschend viel wird aus den Schelfmeeren eingetragen. Deshalb spielt das Eisen, das über die Atmosphäre in die Meere gelangt, eine geringere Rolle, als wir dachten.«

Sehr wichtig ist die Staubdüngung aber unbestritten für das Amazonasbecken. Die Böden dort sind sehr alt. Fortwährend prasselt Regen auf sie nieder, weshalb viele essenzielle Nährstoffe wohl schon vor langer Zeit ausgewaschen wurden. Warum bleibt die Gegend dennoch fruchtbar? Manche meinen, die Zersetzung pflanzlichen Materials sei dafür verantwortlich. Andere halten das für unwahrscheinlich und fragen sich, wie Amazonien überhaupt eine solch üppige Pflanzen- und Tierwelt hervorbringen konnte. »Eine einleuchtende Hypothese besagt, dass die Fruchtbarkeit des Amazonasbeckens zum großen Teil auf den afrikanischen Staub zurückgeht, der Jahr für Jahr niederrieselt«, sagt Daniel Muhs vom U.S. Geological Survey. »Wie sonst hätte sich die enorme Artenvielfalt in einer so heißen, feuchten und alten Landschaft erhalten können, in der die Böden längst ausgelaugt sein sollten?«

Neue Studien haben interkontinentale Staubdriften auch in anderen Gebieten bestätigt. Muhs etwa hat sie anhand von Bodenproben für verschiedene Karibische Inseln nachgewiesen. »Auf einigen davon besteht die Erde ausschließlich aus afrikanischem Staub, auf anderen zumindest teilweise«, erläutert er. Manche Inseln setzen sich aus Kalkstein, Korallenriffen und Sand zusammen, doch ihre Bodenkrume ist reich an Lehm, Ton und Aluminiumsilikaten mit erkennbar anderer Herkunft. Für diese Materialien gibt es zwei mögliche Quellen: Asche aus einem vulkanisch aktiven Teil der Karibik oder Staub aus Afrika. An einigen Orten, etwa auf Barbados, bestehen die Böden aus beidem. Anderswo, etwa auf den Bahamas und den Florida Keys, stammt fast das gesamte Material aus Afrika. »Unsere Untersuchungen auf Barbados an fossilen Riffen deuten darauf hin, dass die interkontinentale Staubdrift schon seit hunderttausenden Jahren andauert«, sagt Muhs.

Nicht nur die Staubpartikel haben eine tief greifende Wirkung auf das Klima, der Einfluss wirkt auch umgekehrt. »Der Klimawandel verändert die Windgeschwindigkeiten und Niederschläge«, sagt Prospero, »und das hat Folgen für den Staubtransport. Die Körnchen reagieren schon auf kleine Veränderungen bei Wind und Regen.« Hinweise darauf finden sich etwa in Eiskernen: Während früherer Kaltzeiten setzte sich mehr Staub ab als während der Warmzeiten. »Allerdings versuchen wir immer noch herauszufinden, ob zuerst das Huhn oder das Ei da war«, sagt Muhs. »Führten die Kaltzeiten zu stärkerem Staubniederschlag oder verursachte mehr atmosphärischer Staub die Kaltzeiten? Da gibt es viele Rückkopplungen, und es wird schnell sehr kompliziert.« Das macht die vermeintlich einfachen Lösungen des Klimawandelproblems – etwa Bioengineering-Träume wie das Düngen der Ozeane mit Eisen – von vornherein verdächtig.

Auch John M. Prospero betont, dass die verschachtelten Rückkopplungsschleifen des Klimageschehens kaum verstanden sind. In den ersten Jahrzehnten seiner Staubforschung beobachtete er gut nachvollziehbare Phänomene. So fielen hohe Staubeinträge auf Barbados und in Miami zeitlich eng mit Dürreperioden in Nordafrika zusammen: je trockener dort, umso mehr Staub hier. Doch in den 1990er Jahren änderte sich das. »Jetzt gibt es keine Korrelation mehr, und wir wissen nicht, was vor sich geht. Das verwirrt uns und macht uns Sorgen«, sagt Prospero. Er befürchtet, der Staub könne ein weiterer Indikator dafür sein, dass das komplexe Klimasystem immer mehr aus dem Gleichgewicht gerät.

DER AUTOR

Jeffrey Bartholet ist langjähriger Auslandskorrespondent der Zeitschrift »Newsweek« und früherer Leiter des »Newsweek«-Büros in Washington.

QUELLEN

Prospero, J. M. et al.: Environmental Characterization of Global Sources of Atmospheric Soil Dust Identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Absorbing Aerosol Product. In: Reviews of Geophysics 40, 1002, 2002

Shao, Y. et al.: Dust Cycle: An Emerging Core Theme in Earth System Science. In: Aeolian Research 2, S. 181–204, 2011

WEBLINKS

www.rgs.org/OurWork/Grants/Grant+recipients/Example+projects/The+Dustiest+Place+of+Earth.htm
Informationen über das BodEx-Feldexperiment (Bodélé Dust Experiment), ein Projekt der britischen Royal Geographical Society in der Bodélé-Depression

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1152350

Die Zukunft der Schokolade

Den Maya galten Kakaobohnen als Geschenk der Götter, heute begründen sie ein Milliardengeschäft. Doch dessen Zukunft ist ungewiss, denn Klimawandel, Krankheiten und andere Widrigkeiten setzen dem empfindlichen Kakaobaum zu.

Von Harold Schmitz und Howard-Yana Shapiro

Götterspeise, so lautet die Übersetzung des botanischen Namens *Theobroma cacao* für den Kakaobaum. Denn in vorkolumbischer Zeit sahen die Völker Mittelamerikas ein Gebräu aus fermentierten, gerösteten und zerstoßenen Kakaobohnen als zeremonielle Speise an. Die Maya sollen als Erste die wilden Pflanzen in Gärten kultiviert haben. Von den Azteken lernten die spanischen Eroberer den heute gebräuchlichen Begriff Schokolade: »xocóatl«, bitteres Wasser, nannten sie das heilige Getränk.

Mitte des 16. Jahrhunderts brachten die Konquistadoren Kakaobohnen mit in ihre Heimat, wo Adlige sich den Aufguss gesüßt und mit Aromen versetzt servieren ließen. Bereits im folgenden Jahrhundert war die Trinkschokolade eine elitäre Mode geworden, in der Folge verbreitete sich der Plantagenanbau in den Kolonien.

Zudem schrieb man dem Getränk allerlei heilende Wirkung zu. Im 19. Jahrhundert galt Kakao beispielsweise den Kubanern als Aphrodisiakum, und zu Beginn des 20. Jahrhunderts empfahl die berühmte amerikanische Köchin Fanny Farmer seinen stimulierenden Effekt bei schwacher Verdauung. Seit wenigen Jahren wissen Pharmazeuten, dass die Bohnen tatsächlich medizinisch wirksame Substanzen ent-

Bis zu 30 Zentimeter lang sind die Baumfrüchte, aus deren Samen heutzutage das Produkt Schokolade in einer kaum überschaubaren Variantenvielfalt hergestellt wird.

AUF EINEN BLICK

BEDROHTE LECKEREI

1 Schokolade wird aus Kakaopulver hergestellt, das man aus den **Samen des Kakaobaums** gewinnt. Doch diese Pflanze gibt Anlass zur Sorge: Da sich die wenigen Sorten genetisch stark ähneln, können sich **Pilz- und Virusinfektionen** wie Seuchen ausbreiten.

2 Weitere Probleme: Die **Klimaerwärmung** bedroht die klassischen Anbaugebiete in Afrika und Lateinamerika. Armut und unzureichende Kenntnisse erschweren den Einsatz ertragssteigernder Techniken.

3 Wissenschaftler nutzen genetische Informationen, um **widerstandsfähigere Sorten** zu züchten. Außerdem gilt es, die Bauern besser zu schulen, ihnen Zugang zu preiswertem Dünger zu verschaffen und neue Methoden etwa zu **Bewässerung und Schädlingsbekämpfung** zu erproben.

ADAM VOORHES PHOTOGRAPHY

halten. So weisen einige Studien etwa darauf hin, dass der Verzehr dunkler Schokolade hohen Blutdruck senken kann. Freilich nur in angemessener Dosierung, denn die Leckerei ist ausgesprochen kalorienreich.

Die eigentliche Karriere des Kakaos begann freilich, nachdem der holländische Apotheker Coenraad van Houten ein Verfahren ersonnen hatte, durch Walzen der zerkleinerten Bohnen Kakaobutter zu gewinnen und sie später zusammen mit Zucker und anderen Ingredienzien dem Pulver wieder beizumischen – das Ergebnis ist die beliebte feste Schokolade.

Von der Hand in den Mund

Nur etwa zehn Prozent der Kakaobohnen stammen von großen Plantagen. Tatsächlich leben weltweit fünf bis sechs Millionen Familien von ihren Bäumen, die meisten davon im tropischen Afrika: Die Republik Côte d'Ivoire (Elfenbeinküste) liefert 40 Prozent des weltweit verbrauchten Rohkakaos, Ghana, Nigeria und Kamerun zusammen weitere 30 Prozent. Die Bauernfamilien und ihre Arbeiter ernten die 25 bis 30 Zentimeter großen Früchte, lösen die darin liegenden 30 bis 60 Samen heraus, lassen sie in Kisten oder Fässern gären und dann in der Sonne trocknen. Nun sind die Bohnen lagerfähig und werden zur Weiterverarbeitung verschifft. Die zweite Phase bis zum Verkauf der fertigen Produkte sichert weiteren 40 bis 50 Millionen Menschen ihren Lebensunterhalt.

Die Bedeutung des Kakaoanbaus zeigen auch folgende Angaben: 15 Prozent des Bruttoinlandsprodukts der Republik Côte d'Ivoire basieren darauf, und fünf Prozent aller Haushalte dort leben davon. Reich werden die Bauern allerdings nicht: »Viele leben von der Hand in den Mund. Sie pflücken einige Früchte und verkaufen sie schnell, um Schulgebühren oder Arztkosten bezahlen zu können«, berichtet Peter Läderach vom International Center for Tropical Agriculture. Er leitete Studien über die Auswirkung des Klimawandels auf den Kakaoanbau in der Republik Côte d'Ivoire und in Ghana.

Solche Forschung tut not, denn *Theobroma cacao* ist ein heikles Gewächs: Es bevorzugt fruchtbare, durchlässige Böden, die in den Tropen jedoch selten sind, außerdem braucht es Wärme und Feuchtigkeit. Das beschränkt die Anbaugebiete auf einen schmalen Gürtel von etwa 18 Grad geografischer Breite nördlich beziehungsweise südlich des Äquators. Die dortigen Bedingungen fördern aber auch Schädlinge und Pilzinfektionen. 1982 eröffnete der Lebensmittelkonzern Mars daher in der Anbauregion von Bahia (Brasilien) ein Zentrum für Kakaoforschung. Sechs Jahre später entdeckten Forscher in den Plantagen die durch Pilze verursachte Hexenbesenkrankheit (witches' broom), die ihren Namen besenartigen Wucherungen verdankt. Befällt der Pilz *Moniliophthora periciosa* eine Blüte, bringt diese keine Frucht hervor. Befallene Triebe müssen herausgeschnitten und verbrannt werden, doch die Krankheit ist hartnäckig. In der Region Bahia sackte der Ernteertrag um 80 Prozent ab; Familien, die seit Generationen vom Kakaoanbau gelebt hatten, mussten ihre Farmen verlassen. Derzeit breitet sich erneut eine Pilzkrankheit in Lateinamerika aus: die Weiße Schotenfäule (frosty pod, *Moniliophthora roreri*), die junge Kakaofrüchte befällt. Noch sind beide auf den amerikanischen Kontinent begrenzt. Würden sie in die Anbaugebiete Afrikas gelangen, drohte weltweit ein Ernteeinbruch um bis zu 25 Prozent. Und das bei wachsender Nachfrage: Von derzeit etwa 3,7 Millionen Tonnen soll sie bis 2020 auf mehr als 4 Millionen Tonnen Kakao steigen.

MIT FRDL. GEN. VON MARS INCORPORATED

Die gebräuchlichsten Sorten des Kakaobaums ähneln sich in ihrer Erbsubstanz. Das fördert die Anfälligkeit für Krankheiten

Doch auch außerhalb Amerikas gibt es genug Probleme: Die Larven der javanischen Kakaomotte (cacao pod borer, *Conopomorpha cramerella Snellen*) bohren sich in die Früchte und fressen deren Fleisch; die Tiere verursachen in Südostasien Verluste von bis zu 600 Millionen Dollar pro Jahr. Dort grassiert auch der Pilz »vascular-streak dieback« *(Oncobasidium theobromae)*, der dafür sorgt, dass die Bäume ihre Blätter verlieren. Der »swollen shoot virus« aus der Familie der Caulomoviridae wird in Westafrika von Schmierläusen beim Saugen des Pflanzensafts übertragen und lässt einen Kakaobaum nach spätestens zwei Jahren absterben. Außerdem ist in Ghana die Schwarzfäule (black pod rot) verbreitet, deren Verursacher zur Gattung der *Phytophtora* gehören, das sind pilzähnliche Mikroorganismen, auch Oomyceten oder Algenpilze genannt. Experten fürchten, dass diese Plagen bald

Dieser Kakaobaum (links) auf den Philippinen ist von der Schwarzfäule betroffen. Die Infektion durch pilzähnliche Mikroorganismen ist leicht an den Verfärbungen der Früchte zu erkennen.

Brasilianische Bauern setzen neuerdings ihre Kakaobäume zusammen mit anderen Bäumen, hier mit Kokosnusspalmen. So können sie nicht nur das ganze Jahr hindurch Nahrungsmittel ernten und Einkommen erzielen; das heterogene Wurzelwerk sorgt obendrein dafür, dass der Boden Wasser besser speichert.

MIT FRDL. GEN. VON MARS INCORPORATED

auch auf die benachbarte Republik Côte d'Ivoire übergreifen könnten. Westafrika stünde dann ein ähnlicher Ertragseinbruch bevor wie Brasilien Ende der 1990er Jahre.

Die Bedrohung ist nicht zuletzt eine Folge der begrenzten genetischen Vielfalt des Kakaobaums. Unser Kollege Juan Carlos Motamajor und sein Team fanden heraus, dass es von der botanischen Art *Theobroma cacao* gerade einmal zehn genetisch unterschiedliche Varietäten gibt. Mit anderen Worten: Die auf den Plantagen dieser Welt gebräuchlichen Sorten ähneln sich in ihrer Erbsubstanz sehr. Das erleichtert es zwar, sie miteinander zu kreuzen, macht sie aber auch mehr oder weniger gleich anfällig für Krankheiten und Schädlinge. Ziehen Bauern aus den selbst geernteten Samen neue Bäume, schwächt lokale Inzucht die Widerstandskraft ihrer Pflanzen noch weiter.

Der Anbau wird aus einem weiteren Grund zunehmend problematisch. Die Landwirtschaft in den Tropen hatte immer schon mit extremen Wetterverhältnissen zu kämpfen – Fluten, Dürren und Stürme kommen regelmäßig vor. Nun könnte der Klimawandel alles noch schlimmer machen. 2007 sagte der Report des Intergovernmental Panel on Climate Change voraus: Bis 2020 könnten in einigen Ländern Afrikas die Erträge um bis zu 50 Prozent zurückgehen, sofern die Flächen allein durch Regen bewässert werden – das betrifft auch den Kakaobaum. Läderachs Forschungen zufolge müssten Anbaugebiete in Ghana und der Republik Côte d'Ivoire in höher gelegene Regionen verlegt werden, um dem Anstieg der mittleren Temperatur Rechnung zu tragen, doch »in weiten Bereichen Westafrikas gibt es solche Gebiete gar nicht«, so der Studienleiter. Während Afrika unter Trockenheit und Hitze leiden wird, trifft der Klimawandel Indonesien auf andere Weise: Der jährliche Monsunregen fällt in kürzerer Zeit, dann aber oft mit einer Wucht, die Kakaoblüten beschädigt und damit die Fruchtbildung verhindert.

Die Probleme der Dritten Welt sind auch die Probleme der Kakaoindustrie

Nicht weniger bedrohlich sind gerade in Westafrika die gesellschaftlichen Probleme. So leben in der Republik Côte d'Ivoire und in Ghana Angehörige verschiedener ethnischer Gruppen zusammen – ein Konfliktpotenzial, das durch Migranten aus dem ärmeren Nachbarland Burkina Faso noch verstärkt wird. Kinder- und Zwangsarbeit kommen vor; Mars arbeitet mit den Regierungen zusammen, um die Plantagen der Elfenbeinküste und Ghanas zu zertifizieren. Zudem sind die Eigentumsrechte kompliziert, weshalb Bauern zögern, neue Bäume zu kaufen. Junge Menschen verlassen die Kakaoanbaugebiete und suchen ihr Heil in den Städten, wodurch das Durchschnittsalter auf dem Land steigt, während der Bildungsgrad sinkt. Armut und mangelnde Kenntnisse wiederum haben zur Folge, dass Düngemittel, Herbizide und Pestizide wenig bis gar nicht eingesetzt werden; die Produktivität der Plantagen könnte sonst oft dreimal so groß sein.

Schädlinge, Krankheiten, Klimaveränderung, Armut und fehlendes Wissen – es ist ein ganzes Paket von Problemen, das den Kakaoanbau weltweit gefährdet. Schutzmaßnahmen müssen an all diesen Punkten ansetzen. Beispielsweise verlegt man in Bahia große Kakaoplantagen in höhere Regio-

nen, in denen die üblichen Schädlinge und Infektionen weniger stark grassieren. Damit sie in der prallen Sonne dort produktiv sein können, versorgt man die Bäume mit Wasser, in dem Dünger gelöst ist.

Ein Ziel unserer Forschungseinrichtung ist es, die Erträge zu steigern, ohne durch zusätzliche Landgewinnung Regenwald zu vernichten. Stattdessen müssen vorhandene Brachflächen aufbereitet werden, indem man einerseits die Böden mit Dünger anreichert, andererseits Bäume und Sträucher pflanzt, um die Bodenerosion infolge von Wind und Starkregen zu begrenzen.

In Brasilien beispielsweise lernen Bauern, Agroforstwirtschaft zu betreiben: Sie pflanzen die Kakaobäume zwischen Nahrungsmittelpflanzen und andere Bäume, deren Laub Viehfutter und deren Holz Rohstoff liefern. Die jeweiligen Wurzelstrukturen der unterschiedlichen Bäume verbessern die Speicherkapazität des Bodens für Regenwasser, Trockenzeiten werden länger ertragen. Bauern in Vietnam kämpfen mit schwindendem Grundwasser, weil sie zu viel davon zur Bewässerung entnommen haben. Nun bauen sie Reservoire, um Niederschläge zu sammeln.

Derzeit erbringt ein Hektar Kakaoplantage im Weltdurchschnitt ungefähr 450 Kilogramm Bohnen. Mit Hilfe moderner landwirtschaftlicher Techniken ließe sich dieser Wert leicht auf 1500 Kilogramm steigern. Für viele Kakaobauern entspräche das dem Unterschied zwischen dem täglichen Kampf ums Überleben und einem gesicherten annehmbaren Lebensstandard.

Anfang 2009 startete die World Cocoa Foundation (WCF) ein 40-Millionen-Dollar-Programm, das von der Bill & Melinda Gates Foundation und 16 Unternehmen finanziert wird. Es soll die Lebensgrundlage von schätzungsweise 200 000 Kakaobauern in fünf west- und zentralafrikanischen Ländern verbessern. Im Rahmen des auf fünf Jahre angelegten

Regionale Unterschiede – weltweite Anstrengungen zur Ertragssteigerung

Nur zwischen 18 Grad nördlicher und 18 Grad südlicher Breite finden Kakaobäume günstige Wachstumsbedingungen: Wärme und Feuchtigkeit. Die lassen aber auch Schädlinge und Mikroorganismen gedeihen.

Bedrohungen

Die Weiße Schotenfäule, eine Pilzerkrankung, hat sich über Mittelamerika ausgebreitet und könnte bald Brasilien erreichen.

Infolge der Klimaerwärmung fallen **Niederschläge** in Brasilien **nur unregelmäßig**.

Arme Bauern in Ghana und anderen Staaten Westafrikas können sich Düngemittel, Fungizide und Pestizide nicht leisten. Ihre Erträge bleiben daher weit hinter den Möglichkeiten zurück.

Die Kakaomotte verursacht in Ostasien jährlich Ernteverluste von hunderten Millionen Dollar.

Massnahmen

Mit Hilfe der Genkarte des Kakaobaums identifizieren Wissenschaftler genetische Varianten, die widerstandsfähiger gegen Krankheiten sind. So können Züchter ihre Kreuzungen besser selektieren.

Agroforstsysteme sind Mischpflanzungen, die nicht nur Erträge steigern, sondern auch Trockenzeiten besser überstehen.

Das Cocoa Livelihoods Program schult Bauern und verbessert so die Effizienz ihrer Arbeit.

Um die Biodiversität in der jeweiligen Region zu erhalten, setzen Bauern die **natürlichen Feinde der Schädlinge** ein, in Südostasien beispielsweise Schwarze Ameisen gegen die Kakaomotte.

GEORGE RETSECK, NACH: UNITED NATIONS FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION

Projekts erhalten einige von ihnen eine Ausbildung und geben ihre Kenntnisse dann an andere weiter. Neben den spezifischen Themen wie Krankheitsmanagement, Baumschnitt und Ernte gehören auch Malaria, HIV/Aids, technische Sicherheitsvorkehrungen und das Vermeiden von Kinderarbeit zu den Themen. Laut Bill Guyton, Präsident des WCF, steigerten Absolventen der Kurse ihr Einkommen um 23 bis 55 Prozent.

Vor zwei Jahren gelang ein großer Schritt nach vorn: Wissenschaftlern unseres Konzerns, Forschern des Agricultural Research Service (ARS; eine Einrichtung des US-amerikanischen Landwirtschaftsministeriums), von IBM und weiteren Einrichtungen war es gelungen, das Genom der so genannten Varietät Matina 1-6 von *Theobroma cacao* zu sequenzieren und zu analysieren. Diese gilt als der Vorläufer von mindestens 96 Prozent aller Kakaobäume. Die Ergebnisse wurden frei zugänglich gemacht. Ein anderes Konsortium, das von der französischen landwirtschaftlichen Forschungsorganisation CIRAD geleitet wird, veröffentlichte bald darauf die Gensequenz einer anderen Kakaosorte.

Von Nutzen sind solche Analysen vor allem dann, wenn sie die Züchter in den Anbauländern unterstützen. So entdeckte Wilbert Phillips-Bora in Costa Rica eine Kulturvarietät, die sich weniger anfällig gegen »frosty pod rot« zeigte. Er schickte Proben davon an die Molekularbiologen in einem von Mars mitorganisierten Netzwerk, um anhand der Genkarten jene Genvarianten zu identifizieren, die diese Widerstandsfähigkeit verleihen. Damit kann man nun bei Züchtungsversuchen leichter überprüfen, ob eine neue Sorten die begehrte Eigenschaft trägt. Schon jetzt pfropfen Bauern in Lateinamerika Zweige der entsprechenden Varietät auf ihre Bäume.

Es wurden auch schon gegen die Hexenbesenkrankheit resistente Sorten entdeckt, allerdings produzieren sie Kakaobohnen schlechter Qualität. Derzeit suchen Wissenschaftler nach der genetischen Grundlage, die einer bestimmten Sorte Widerstandskraft gegen die in Südostasien grassierende Krankheit »vascular-streak dieback« verleiht. Letztendlich hoffen sie, durch sorgfältige Kreuzungen Resistenzen mit hohem Ertrag und gute Qualität zu kombinieren. Natürlich gibt es noch etliche und durchaus sehr ehrgeizige weitere Ziele: Bäume, die auch bei Hitze und Wassermangel gedeihen, sowie eine geringere Wuchshöhe. Bei der Ernte schneiden die Farmer die Kakaofrüchte mit Messern ab, die sie an langen Stäben befestigen. Diese Arbeit ist anstrengend, zudem besteht die Gefahr, die Pflanzen zu verletzen. Niedrigere Sorten wären eine große Erleichterung.

Neben der Erhöhung der Erträge gilt es auch, diesen Landwirtschaftszweig nachhaltig zu gestalten. Und zwar nicht allein im Sinn einer Bewahrung der Plantagen für künftige Generationen, sondern auch in ökologischer, ökonomischer und sozialer Hinsicht. Effektive Dünger, Fungizide und Schulungsprogramme gibt es bereits, Bauern und Labore entwickeln miteinander widerstandsfähigere Sorten. Zum Maßnahmenpaket gehört das schon erwähnte Konzept der Agroforstwirtschaft ebenso wie der Kampf südostasiatischer Pflanzer gegen die Kakaomotte mit Pheromonfallen und dem natürlichen Feind der Schädlinge – Schwarzen Ameisen – statt mit einem vermehrten Einsatz von Pestiziden. Entscheidend ist, dass die Summe dieser Maßnahmen letztlich den Bauern ein sicheres Einkommen verschafft und so auch die sozialen Spannungen in den Anbauländern mindert.

DIE AUTOREN

Der Lebensmittelwissenschaftler **Harold Schmitz** (links) koordiniert als Chief Science Officer alle Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten des US-amerikanischen Nahrungsmittelkonzerns Mars. Zu seinen Forschungsschwerpunkten gehören ökologische, soziale und kulturelle Nachhaltigkeit in der Lebensmittelproduktion. **Howard-Yana Shapiro** ist leitender Mitarbeiter in der Abteilung Plant Science and External Research bei Mars. Er lehrt zudem Botanik an der University of California in Davis. Shapiro koordinierte die verschiedenen internationalen Vorhaben, das Genom des Kakaobaums *(Theobroma cacao)* zu sequenzieren.

QUELLEN

Grivetti, L. E., Shapiro, H.-Y. (Hg.): Chocolate: History, Culture, and Heritage. Wiley, New York 2009

Zapke, S.: Kakao – Fairer Handel für faire Chancen: Alternative Formen zum konventionellen Welthandel mit Kakao. Grin, München 2011

WEBLINKS

www.scientificamerican.com/feb2012/chocolate
Ein englischsprachiger Abriss der Geschichte der Schokolade
www.youtube.com/watch?v=Da9akV6Ts3M&feature=related
Video über organischen Kakaoanbau

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1149654**

GASSENSOREN

Schnüffelnde Transistoren

Eine perfekte Nase könnte Sprengstoff auffinden, Lebensmittel überprüfen und alle erdenklichen Emissionen kontrollieren. Doch bei der Entwicklung eines verlässlichen elektronischen Spürsinns müssen Forscher noch manches Problem lösen.

Von David R. Walt, Shannon E. Stitzel und Matthew J. Aernecke

»Welcher Organsinn ist der undankbarste und scheint auch der entbehrlichste zu sein? Der des Geruchs. Es belohnt nicht, ihn zu kultivieren oder wohl gar zu verfeinern«, schrieb der Philosoph Immanuel Kant im 18. Jahrhundert. Ein recht drastisches Urteil und wohl auch nicht ganz zutreffend, wie jeder weiß, der schon einmal Schnupfen hatte: Die von Speisen und Getränken ausgehenden Düfte werden im Mundraum über den Rachen auch den Riechrezeptoren zugeführt. Wäre dem nicht so, würden wir Rotweinen keine Vanillenote zuschreiben und Fernsehkochduelle lediglich nach den Geschmacksgrundkategorien sauer, salzig, süß, bitter und glutamatartig (umami) entscheiden. Zudem kann der Geruchssinn Leben retten: indem er vor giftiger und verdorbener Nahrung, toxischen Gasen oder Raubtieren warnt.

Vor allem diese einzigartige Fähigkeit veranlasst Forscher seit gut 30 Jahren, künstliche Nasen zu entwickeln, die den Riechsinn der Säugetiere mit technischen Mitteln zumindest ansatzweise imitieren. Sie könnten in der Lebensmittelherstellung Gärungsprozesse überwachen oder die Frische transportierter Produkte prüfen, in der medizinischen Diagnostik Mikroben, in der Sicherheitstechnik Nervengase und Sprengstoffe aufspüren. Denn Menschen oder auch eigens geschulte Tiere vermögen nicht alle solche Stoffe zu riechen. Abgesehen davon: Lebewesen ermüden, ihre Wahrnehmung gewöhnt sich an einen Dauerreiz und ist überdies stets subjektiv. Der amerikanische Erfinder Alexander Graham Bell klagte deshalb 1914 in einem Vortrag: »Haben Sie je versucht, einen Geruch zu messen? Kann man sagen, dass ein Geruch doppelt so stark ist wie ein anderer? Wenn Sie den Ehrgeiz haben, eine neue Wissenschaft zu begründen, messen Sie einen Geruch.«

Es sollte noch Jahrzehnte dauern, bis Forscher dieser Forderung nachkamen, denn olfaktorische Systeme (nach dem lateinischen olfacere = riechen) sind kompliziert. Säugetiere können Tausende verschiedener Gerüche erkennen, einerlei ob es sich dabei um eine einzige Molekülsorte handelt oder um ein Gemisch aus verschiedenen Komponenten. Zudem erfolgt die Wahrnehmung sekundenschnell und in Konzentrationen, die vom gesättigten Dampf bis zum ppb-Bereich (parts per billion, Teile pro Milliarde) reichen.

Durch Einatmen gelangen die Moleküle zur Schleimhaut der Nasenhöhle. Schon dabei können Mischungen allein durch den zurückzulegenden Weg aufgetrennt werden, bevor sie zu den Sinneszellen gelangen. Die amerikanischen Forscher Linda Buck und Richard Axel haben 1991 den biochemischen Mechanismus des Riechens aufgeklärt (Nobelpreis für Medizin 2004): Proteine in den Zellmembranen bilden Hohlräume; passt ein Duftmolekül hinein, löst das eine biochemische Kaskade aus. Dabei wird der Reiz derart verstärkt, dass schon bei geringsten Konzentrationen ein elektrisches Signal entstehen kann und über den Riechnerv zu den Verarbeitungsstationen im Gehirn gelangt.

Im Unterschied zu den Rezeptormolekülen anderer Sinne sind Duftrezeptoren keine selektiven Spezialisten, sondern reagieren auf viele Substanzen, sofern diese sich chemisch ähneln; je größer die Abweichung, desto schwächer fällt die Rezeptorantwort aus. Säugetiergenome kodieren etwa 1000 solcher Moleküle; dank der Breitbandreaktion lassen sich aber weit mehr Düfte erkennen. Die Signale aller aktivierten Sensoren überlagern einander im Riechkolben, einer zur Na-

AUF EINEN BLICK

MIT ELEKTRONIK RIECHEN

1 Viele **Säugetiere** vermögen Tausende gasförmiger Stoffe voneinander zu unterscheiden und selbst geringe Spuren davon noch wahrzunehmen. Dieser hoch entwickelte Geruchssinn liefert aber nur qualitative Ergebnisse. Außerdem steht er nicht permanent zur Verfügung.

2 Forscher entwickeln deshalb **elektronische Systeme**. Diese sollen etwa zur Prozesskontrolle in der Lebensmittelindustrie eingesetzt werden, die Einhaltung von Emissionsgrenzwerten überwachen oder Gefahrstoffe entdecken.

3 Kern jedes Systems ist ein Array von Sensoren. Die meisten reagieren nicht spezifisch auf bestimmte Gase; die Systeme können Gasgemische lediglich mittels **Mustererkennung** anhand der Sensorantworten voneinander unterscheiden.

senhöhle hin gelegenen Hirnstruktur, zu einem komplexen Antwortmuster. Das ist der Kode, anhand dessen nachgeordnete Instanzen die Identität eines Duftstoffs (Odorant) erkennen und eine bewusste Wahrnehmung generieren. Das Aufsummieren verbessert überdies das Signal-Rausch-Verhältnis und dient auch der Verstärkung.

Das erste Olfaktometer, mit dem sich Düfte messen lassen sollten, präsentierte bereits 1888 der niederländische Physiologe Hendrik Zwandemaker: Er hatte die Innenwand eines großen Reagenzglases mit einer öligen Flüssigkeit bedeckt, die den Duftstoff enthielt, und eine kleinere Röhre eingeführt, an deren Ende ein Proband schnupperte. Die Intensität der Wahrnehmung variierte, je nachdem, wie tief das Röhrchen in den Behälter eindrang. Zwandemaker experimentierte auch mit zwei solchen Geräten gleichzeitig, um zu sehen, welche Düfte sich in ihrer Wirkung aufhoben. Tatsächlich bestand die erste praktische Anwendung dieser Olfaktometer darin, Substanzen zu finden, die schlechte Gerüche neutralisierten.

Des Weiteren dienten sie dazu, die Schwelle der Wahrnehmbarkeit zu bestimmen, indem beispielsweise die Aus-

Raubtiere wittern ihre Beute, Pflanzenfresser wiederum ihre Feinde. Auch dem Menschen hat die Wahrnehmung von Gerüchen im Lauf der Evolution gute Dienste geleistet, etwa bei der Entscheidung, ob Nahrung genießbar oder giftig ist. Elektronische Nasen (im Bild ein Prototyp der NASA) imitieren die biologischen Vorbilder, reichen aber noch lange nicht an sie heran.

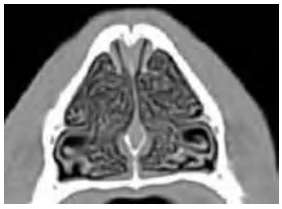
LÖWE: DREAMSTIME / ERIC ISSELÉE; FRAU: FOTOLIA / EKATERINA SOLOVIEVA; KUH: DREAMSTIME / DAN CRETU; KATZE: DREAMSTIME / YOUIK; E-NOSE: RECHTE: NASA JPL / CALTECH

dünstungen von Abfällen immer weiter verdünnt wurden. Weiterentwicklungen solcher »mechanischen Nasen« sind noch heute in Gebrauch, beispielsweise um Schwellenwerte für unangenehm riechende Emissionen zu ermitteln: Jene Konzentration in einer Verdünnungsreihe gilt dann als Grenzwert etwa für Abfallverwertungsanlagen, bei der die Hälfte der Testpersonen keinen Geruch mehr wahrnimmt. Letztlich aber bleiben die Ergebnisse solcher Experimente subjektiv, dementsprechend variieren die Werte bei mehreren Testreihen oft bis zum Vierfachen.

Abhelfen könnten elektronische Nasen, die den Probanden ersetzen. Wie bei den biologischen Vorbildern lassen sich meist drei Hauptkomponenten unterscheiden: Gaszuleitung, Sensorblock und Datenverarbeitung. Erstere führt die zu analysierenden Stoffe den Messfühlern zu. Großenteils geschieht das aktiv durch Pumpen, die Luft ansaugen, insbesondere im so genannten Kopfraum einer festen oder flüssigen Substanz. Das ist der Bereich unmittelbar über ihrer Oberfläche, aus der stets Moleküle austreten und in den gasförmigen Aggregatzustand übergehen. Diese Vorgehensweise liefert Momentanwerte der Konzentrationen; es bedarf daher mehrerer Messungen, um den »wahren« Wert zu bestimmen. Es gibt auch passive Systeme, bei denen das Gas in der Messkammer zunächst einen stationären Zustand erreicht, in dem sich die Konzentrationen nicht mehr ändern, bevor die Sensoren ausgelesen werden. Den Zeitverlauf einer Gasexposition zu messen, entspricht aber eher dem natürlichen Vorbild; aktive Technik ist daher erfolgreicher, wenn es um die Unterscheidung verschiedener Düfte in einem Gemisch geht.

Tiermodell – einmal anders

Die Anatomie der Hundenase, mittels Computertomografie (oben) erfasst, ahmten die Autoren in einem Plastikmodell nach (unten). Fünf Stellen (Zahlen im Bild) bestückten sie mit Geruchssensoren. Durch den komplexen Luftstrom trennen sich Gasgemische auf ihrem Weg durch das Modell auf und sind besser zu unterscheiden. Über die mit Doppelpfeil markierten Öffnungen lässt sich das Modell verschließen.



BEIDE ABBILDUNGEN AUS: STITZEL, S. E. ET AL.: ENHANCING VAPOR SENSOR DISCRIMINATION BY MIMICKING AVIAN NASAL CAVITY FLOW DYNAMICS. IN: ANALYTICAL CHEMISTRY, AMERICAN CHEMICAL SOCIETY 125, S. 3684–3685, 2003; ABDRUCK MIT FRDL. GEN. DER AMERICAN CHEMICAL SOCIETY

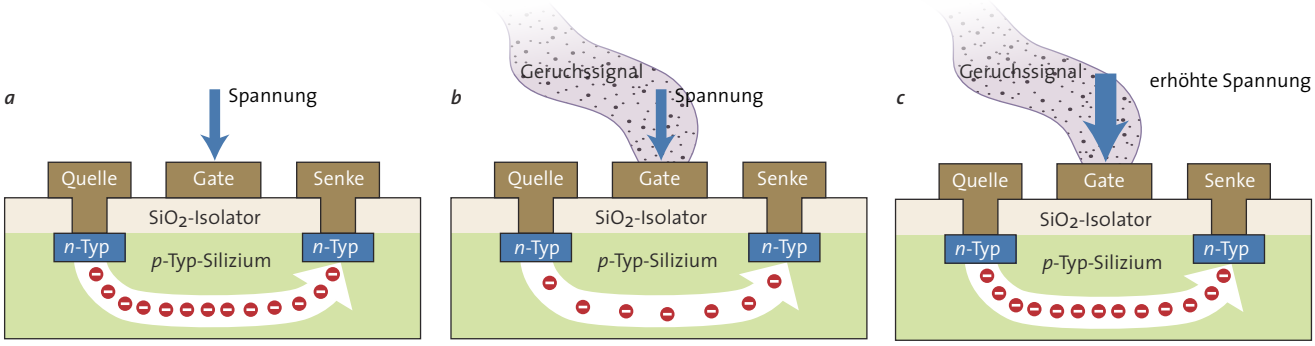
Eine weitere Anleihe bei der Biologie im Bereich der Luftzufuhr besteht darin, die Messzellen in eine mehrere Zentimeter lange absorptive Schicht einzubetten, was Nate Lewis und seine Kollegen am California Institute of Technology in Pasadena versuchen. Damit imitieren sie das Eindringen der Duftmoleküle in die Schleimhaut, was eine zusätzliche raumzeitliche Komponente verleiht und wieder das Unterscheidungsvermögen bei Gasgemischen verbessert. Unsere Gruppe an der Tufts University verfolgt noch einen anderen Ansatz: Wir haben die Anatomie einer Hundenase aus Kunststoff nachgebaut (siehe Kasten unten). Es zeigt sich, dass die dadurch entstehenden Luftströmungen ebenfalls verschiedene Gase in einem Gemisch trennen.

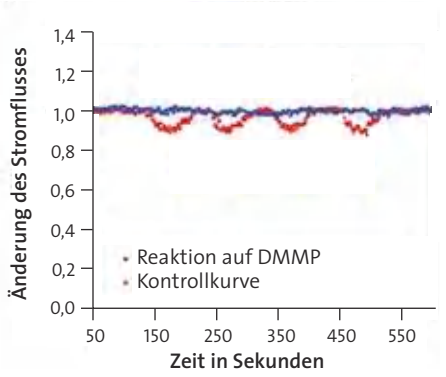
Auch künstliche Nasen müssen trainiert werden

Letztlich ist es Aufgabe einer elektronischen Datenverarbeitung, im Signalmuster der Sensoren die Gase zu erkennen. Mit anderen Worten: Die Messwerte müssen klassifiziert werden. Die Trefferquote der Mustererkennung verbessert sich, wenn der Algorithmus während der Anwendung aus seinen Fehlern lernen kann. Das lässt sich durch eine Trainingsphase vorbereiten. Dazu präsentiert man dem Messgerät bereits bekannte Reize und korrigiert seine Antworten. So entwickelt es eine Datenbank von »Deskriptoren«, um später auch unbekannte Gerüche ohne Rückmeldung eines Menschen einzig anhand von Ähnlichkeiten mit den schon vorliegenden Informationen zu klassifizieren. Die natürliche Wahrnehmung kommt allerdings ohne Anfangswissen aus. Dem entspricht in der Technik das nichtüberwachte Lernen. Hier muss der Algorithmus – beispielsweise ein neuronales Netz – anhand der Messwerte selbst Geruchsklassen definieren.

Das Herzstück einer elektronischen Nase ist der Sensorblock, der auf eine gasförmige Substanz mit einem elektrischen Signal reagiert. Es gibt diverse Arten, ihn zu realisieren, aber die meisten nutzen eines von drei Messprinzipien: elektrisch, massenabhängig oder optisch. Alle drei werden bereits in kommerziellen Systemen eingesetzt, mitunter mit einem vorgeschalteten Gaschromatografen oder Massenspektrometer. Erstere trennen Gasgemische nach dem jeweiligen Dampfdruck und der Polarität der Moleküle auf, Letztere auf Grund verschiedener Massen.

Bereits 1954 erkannte der deutsche Physiker G. Heiland von der RWTH Aachen, dass Gase die Ladungsträgerkonzentration in halbleitenden Metalloxiden beeinflussen können. Tetsuro Seiyama von der Kyushu-Universität in Fukuoka (Japan) beobachtete 1962, dass manche Spurengase die elektrische Leitfähigkeit dünner Zinkoxidschichten bei Temperaturen um 300 Grad Celsius verändern. Im gleichen Jahr beschrieb sein Landsmann Naoyoshi Taguchi Ähnliches bei gesinterten Zinndioxid und schlug vor, diesen Effekt zum Nachweis von Gasen zu nutzen. Anfang der 1970er Jahre brachte das von ihm mitbegründete Unternehmen Figaro in Osaka erste Halbleitergassensoren auf den Markt. Heute gibt es weltweit eine Vielzahl kommerzieller Anbieter dieser Pro-





GRAFIK OBEN: AMERICAN SCIENTIST; UNTEN: STAU, C. ET AL.: DNA-DECORATED CARBON NANOTUBES FOR CHEMICAL SENSING. IN: NANO LETTERS 5, S. 1774–1778, 2005; FIG. 4; ABDRUCK MIT FREUNDL. GEN. DER AMERICAN CHEMICAL SOCIETY

Der Feldeffekttransistor (FET, a) ist ein Sensortyp, der häufig in künstlichen Nasen eingesetzt wird. Eine Spannung am Gate sorgt für einen konstanten Stromfluss von der Quelle zur Senke, die beide meist aus *n*-Typ-Silizium bestehen. Das ist ein Halbleiter, in dem freie Elektronen die elektrische Ladung transportieren. Erreicht eine gasförmige Substanz das Gate (b), ändert sich die notwendige Spannung (c) oder der Strom sinkt. Den gleichen Effekt haben auch FETs, deren Gate aus beschichteten Nanokohlenstoffröhren aufgebaut ist (rechts): Die roten Messkurven zeigen die Reaktion auf DMMP, eine Substanz, die bei Tests das Nervengas Sarin repräsentiert (blaue Kurve: Kontrollgerät).

dukte, die für die Automobilbranche ebenso tätig sind wie für die Verfahrenstechnik.

Halbleitergassensoren reagieren recht unspezifisch auf nahezu alle reduzierenden und oxidierenden – also Elektronen abgebenden oder aufnehmenden – Gase. Die Moleküle reichern sich auf den Halbleiteroberflächen an (Adsorption) und gehen mitunter auch chemische Bindungen ein (Chemisorption). Die dabei stattfindende Wanderung von Ladungsträgern ändert die Leitfähigkeit des Halbleiters entsprechend der Konzentration des Gases.

Ein Nachteil des Verfahrens: Das in der Luft befindliche Wasser chemisorbiert an einer heißen Halbleiteroberfläche als OH-Gruppe und beeinflusst damit ebenfalls die Messung. Wer diese Sensoren einsetzt, muss den entsprechenden Wert deshalb stets mitbestimmen und den Effekt bei der Auswertung berücksichtigen.

Eine trickreiche Variante des Verfahrens verwendet so genannte Feldeffekttransistoren (FETs). Diese bestehen beispielsweise aus einer Basis von *p*-dotiertem Silizium. Die freien Ladungsträger darin sind positiv geladene »Löcher«, also Stellen im Halbleitergitter, an denen Elektronen infolge des Einbaus (Dotierung) von Fremdatomen fehlen. Zwei Kontakte mit – in diesem Fall – *n*-dotiertem Silizium bilden darauf eine »Quelle« und eine »Senke« (source und drain) für Elektronen. Ebenso ist die umgekehrte Paarung möglich: *n*-dotiertes Silizium für die Basis, *p*-dotiertes für die beiden anderen Kontakte. Auf diese Struktur kommt eine Isolierschicht und darauf schließlich als letzte Komponente eines FETs ein »Gate«-Material. Legt man dort eine positive elektrische Spannung an, können ab einem bestimmten Schwellenwert Elektronen von der Quelle zur Senke fließen. Wird aber ein Gas auf der Gate-Elektrode adsorbiert, ändert sich dieser Wert und damit die Spannung, die ein konstanter Strom benötigt. Ein solcher Transistor erfordert keine hohen Temperaturen. Im Lauf der Zeit kann sich aber seine Schwellenspannung verschieben, deshalb muss der Sensor regelmäßig kalibriert werden. Außerdem wird bei der geringeren Temperatur weniger Wasser verdampft, Luftfeuchte macht sich daher stärker bemerkbar.

Organische Halbleiter statt Silizium

Leitfähige Kunststoffe wie Polyacetylen, Polypyrol, Polyanilin und Polythiophen bieten theoretisch eine Alternative zum Silizium. Ihre Leitfähigkeit beruht hauptsächlich auf der Elektronenbewegung entlang ihres »Rückgrats« aus verketteten Monomeren, nicht aber auf Sprüngen von Kette zu Kette. Obwohl man den Mechanismus noch nicht völlig erforscht hat, nimmt man an, dass sich anlagernde Gase das Polymer anschwellen lassen, was den Leitungsweg schließlich unterbricht. Derartige Sensoren sind sehr empfindlich und reagieren noch auf Konzentrationen von 0,1 ppm (parts per million).

Auch elektrisch isolierende Polymere eignen sich – sofern sie mit leitfähigen Materialien wie Ruß, Graphit oder Metallpulver versetzt werden. Das Ergebnis ist ein Kompositpolymer, in dem die eingebrachten Partikel Wege für Ladungsträger bilden. Bindet ein Gas, so schwillt das Material wieder an, die Abstände zwischen den eingelagerten Teilchen wachsen und damit steigt auch der elektrische Widerstand des Sensors. Gegenüber reinen Polymeren haben Komposite den Vorteil, dass eine breite Palette von Ausgangsmaterialien zur Verfügung steht, was die Zahl detektierbarer Moleküle erhöht. Beide Varianten haben allerdings auch zwei Nachteile: Zum einen ändert sich im Lauf der Zeit ihr Antwortverhalten durch Oxidation. Zum anderen lässt Luftfeuchte die Polymere besonders stark quellen, weshalb solche Stoffe inzwischen

zwar in Feuchtesensoren genutzt werden, sich bei elektronischen Nasen aber nicht durchgesetzt haben.

Eine Materialneuheit sind winzige Röhrchen, deren Wand aus einer Schicht Kohlenstoff besteht. Sie haben einen Durchmesser von etwa einem Nanometer und leiten den Strom in Richtung ihrer Achse. Daraus hergestellte Strukturen ähneln Feldeffekttransistoren mit Nanoröhren als Gate-Material. Die zu analysierenden Moleküle werden physikalisch an den Oberflächen adsorbiert und ändern dabei deren Leitfähigkeit sowie die Kapazität der Röhrchen, also ihre Fähigkeit, Ladung zu speichern. Durch Beschichtung mit Polymeren oder Metallen lässt sich der Effekt modifizieren. Weil auch Substanzen, von deren Oberfläche nur sehr wenige Moleküle in den gasförmigen Aggregatzustand wechseln, gut entdeckt werden, eignen sich Nanoröhrensensoren theoretisch etwa für die Detektion chemischer Kampfstoffe. Grundsätzlich ist es jedoch schwierig, identische Chargen herzustellen, was die Anwendung dieser Technologie einschränkt.

Gase lassen sich auch anhand ihrer Massen erkennen, beispielsweise mit einer Quarzmikrowaage. Man nutzt hier den piezoelektrischen Effekt: Wird Druck auf eine einkristalline Quarzschicht ausgeübt, verformt sich ihr Kristallgitter. Dabei verschieben sich elektrische Ladungen gegeneinander – elektrische Spannung entsteht. Umgekehrt lässt sich ein Piezokristall durch eine angelegte elektrische Spannung verformen. Auf diesem Prinzip beruhen zum Beispiel Ultraschallköpfe für die medizinische Diagnostik: Eine Wechselspannung versetzt den Kristall in Schwingungen, dieser sendet Schallwellen aus.

Wird die piezoelektrische Schicht mit einer Substanz bedeckt, die Moleküle aus der zugeführten Luft absorbiert, lässt sich die äußerst geringe Massenänderung von einem Nanogramm messen: Bindet ein Molekül, erhöht sich die Masse der Beschichtung und damit sinkt die Resonanzfrequenz des Systems. Allerdings ist auch diese Methode unspezifisch; die Bauelemente sind temperatur- und feuchtigkeitsempfindlich. Sorgt man dafür, dass sich die akustische Welle nur auf der Kristalloberfläche und nicht im Inneren ausbreitet, reduziert das die schwingende Masse, weshalb sich diese Sensoren leicht miniaturisieren lassen. Leider wächst mit der Resonanzfrequenz das Hintergrundrauschen; des Weiteren messen solche Sensoren über längere Zeit nicht sonderlich stabil. Obwohl viele Gruppen seit Jahren an dieser Technik arbeiten, gibt es noch keine kommerziellen Produkte.

Auf Veränderungen im Schwingungsverhalten beruhen auch mikroskopisch kleine Balkensensoren aus Silizium. Ein darauf aufgebrachter chemisch selektiver Film lässt sie vibrieren, denn er dehnt sich unter dem Einfluss der Umgebungswärme nicht im gleichen Maß aus wie das Grundmaterial. Die so hervorgerufene mechanische Spannung und damit die Frequenz der Schwingung ändern sich, wenn der Film Moleküle bindet und seine Masse zunimmt. Das lässt sich auf verschiedene Art bestimmen, beispielsweise indem man einen Laser auf das Ende des Balkens richtet und dessen Bewegungen anhand der Lichtreflexion verfolgt. Solche Sensoren sind sehr empfindlich und können Gasmengen von billionstel Gramm (Pikogramm) bestimmen.

Alle bislang beschriebenen Sensoren verraten allerdings nicht, welche Art von Molekül sich an ihnen anlagert. Sie messen vielmehr die gesamte Menge der Komponenten einer Gasmischung. Allenfalls Mustererkennungsverfahren können anschließend Gemische voneinander unterscheiden, denn die Sensorantworten fallen durchaus verschieden aus. Doch die Zusammensetzung der Probe lässt sich damit nicht analysieren. Anders hingegen Kunstnasen, die auf optische Prinzipien setzen. Beispielsweise wechseln manche Pigmente ihre Farbe, wenn sich ein bestimmtes Gas in ihnen löst. Der erste Messfühler dieser Art nutzte eine mit einem Farbstofffilm beschichtete Glaskapillare: Die chemische Reaktion veränderte die Lichtdurchlässigkeit des Films. Eine Variante zeigten Otto Wolfbeis und seine Kollegen an der Universität Regensburg auf: Herkömmliches Thermopapier für Drucker reagiert mit organischen Dämpfen wie Ether und Alkohol durch Farbänderungen, was die Lichtabsorption bei einer Wellenlänge von 605 Nanometern beeinflusst.

Farbstoffsensoren auf Papier gedruckt

Verschiedene Gruppen untersuchen in diesem Zusammenhang Metallporphyrine auf ihre Eignung für Sensoren. Das sind chemische Verbindungen mit ringartiger Struktur, wie sie sich auch bei Hämoglobin und Chlorophyll finden. Diese Moleküle sind stabil und gut erforscht. Sie lassen sich modifizieren, indem man entweder die Komponenten in der Ringstruktur ändert oder das im Zentrum des Rings gebundene Metallion austauscht. Kenneth Suslick und seine Kollegen von der University of Illinois haben solche Farbstoffe auf inerte Oberflächen wie Papier oder Kunststoff aufgedruckt. Wurden sie dann Dämpfen ausgesetzt, wechselten die verschiedenen Pigmente ihre Farbe; ein Flachbettscanner erfasste das Resultat. Ein Vorher-nachher-Vergleich ergab eine per Mustererkennung auswertbare Farbbildkarte. Leider ist der Farbwechsel nicht immer umkehrbar, diese Sensoren lassen sich dann nur einmal verwenden.

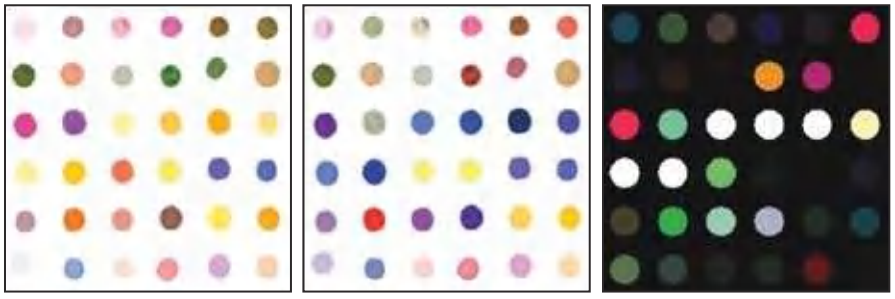
Ein viertes Grundprinzip basiert auf der Fluoreszenz von Polymeren oder Farbstoffen. Die Aufnahme von Gasen verändert die Dauer des Leuchtens, dessen Spektrum oder Intensität. Um den Sensor anzuregen, benötigen solche Systeme eine Lichtquelle – oft einen Laser, eine Leuchtdiode oder eine Xenon-Bogenlampe –, um ihn auszulesen, einen lichtempfindlichen Detektor. Auf diesem Gebiet sind wir selbst tätig. In der ersten Generation brachten wir farbstoffgetränkte Polymere jeweils auf ein Ende optischer Fasern auf, an das andere schlossen wir Mikroskop und Kamera an. Kam ein Bündel präparierter Fasern mit einem Gas in Kontakt, so drang dieses unterschiedlich tief in die Polymere ein und verschob damit das Spektrum des resultierenden Fluoreszenzlichts. Leider gibt es einen gewaltigen Nachteil: Der Farbstoff bleicht aus und ist schließlich nicht mehr zu gebrauchen.

Unsere optische Nase der zweiten Generation besteht aus Mikrokugeln aus fluoreszierendem Polymer oder Siliziumdioxid, nicht mehr als etwa drei Mikrometer im Durchmesser. Ein Gramm davon enthält Milliarden von Kügelchen. Sie werden in geätzte Vertiefungen an den Enden optischer Fasern platziert, die wiederum aus Bündeln von tausenden Strängen bestehen. Bei Kontakt mit einem spezifischen Gas zeigt jeder Materialtyp eine charakteristische Emissionswellenlänge, was es erlaubt, seine Position im Bündel zu bestimmen.

Ist ein Kügelchen durch Ausbleichen unbrauchbar geworden, übernimmt ein anderes. Unser System der ersten Generation hatte 19 Sensoren auf einadrigen Fasern, der Nachfolger weist mehr als 40 000 Sensoren auf. Bei einer so großen Zahl messen einige davon zwangsläufig die gleichen Gase, so dass wir ihre Signale aufsummieren können. Das Ergebnis lässt sich dann besser vom Grundrauschen unterscheiden. Problematisch ist es allerdings, ausreichend geeignete Farbstoffe mit großen und unterschiedlichen Verschiebungen der Wellenlängen zu finden.

Aromatest in bunten Farben

Kaffeeverkoster urteilen subjektiv – daran kann auch eine gute Schulung nichts ändern. Eine elektronische Nase könnte das Verfahren objektivieren. Bei einem Versuch der Autoren basierten die Sensoren auf Farbstoffen, die auf die Anlagerung von Aromastoffen hin ihre Farbe ändern. So entsteht für jeden Duft ein charakteristischer »Fingerabdruck«, wie der Vergleich verschiedener Kaffeesorten beweist.



vor dem Kontakt | nach dem Kontakt | Differenzbild

Maxwell House Original | Folgers kolumbianisch | Eight O'Clock Hazelnut | Starbucks Espresso | Café Mai traditionell

OBEN: JANZEN, M. C. ET AL.: COLORIMETRIC SENSOR ARRAYS FOR VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS. IN: ANALYTICAL CHEMISTRY 78, S. 3591–3600, 2006, FIG. 3; MITTE AUS: SUSLICK, B. A. ET AL.: DISCRIMINATION OF COMPLEX MIXTURES BY A COLORIMETRIC SENSOR ARRAY: COFFEE AROMAS. IN: ANALYTICAL CHEMISTRY 82, S. 2067–2073, 2010; BEIDE ABBILDUNGEN MIT FRDL. GEN. DER AMERICAN CHEMICAL SOCIETY; FOTO UNTEN: CORBIS / REUTERS, PILAR OLIVARES

Heutzutage sind diverse elektronische Nasen auf dem Markt. Bei Nahrungsmitteln und Getränken dienen sie bereits zur Qualitätskontrolle bei Produktion, Transport und Lagerung. Sie dringen hier in einen Bereich vor, der bislang Menschen vorbehalten war, denn diese werden trotz aller Ausbildung stets subjektiv urteilen und überdies nach einer gewissen Zeit ermüden.

Herkunftsangaben im Geruchstest

Ein wichtiges Anwendungsgebiet ist die Fermentation, ein zentraler Schritt bei der Herstellung vieler Nahrungsmittel. Die Überwachung flüchtiger Verbindungen im Kopfraum über dem werdenden Produkt hilft festzustellen, wann der Prozess gestoppt werden sollte oder ob eine Charge durch einen unerwünschten Mikroorganismus kontaminiert wurde. In einer Studie wurde beispielsweise eine elektronische Nase aus acht Metalloxid-Halbleitersensoren zur Überwachung der Fermentation von Teeblättern eingesetzt. Nach einer Trainingsphase konnte sie vier Prozessstadien unterscheiden und den optimalen Zeitpunkt zum Abbruch des Vorgangs identifizieren. Auch bei der Herstellung von Antibiotika und anderen Arzneimitteln, die biotechnisch, also von Mikroorganismen erzeugt werden, könnten solche Sensoren gute Dienste bei der Prozesssteuerung leisten.

Die Analyse flüchtiger Verbindungen, die von einem Produkt ausgasen, mag sogar Aufschluss über dessen Herstellungsort geben und so eine Echtheitsprüfung unterstützen.

MINE SASETY APPLIANCES (MSA) – THE SAFETY COMPANY

Mit künstlichen Nasen lassen sich bereits Essigarten und Aprikosensorten nach Regionen unterscheiden. Auch die Aromen, die einen Wein auszeichnen, hängen nicht nur von Traubensorte und Jahrgang ab, sondern zudem vom jeweiligen Anbaugebiet. Um eine elektronische Nase einzusetzen, müssten aber zunächst gasförmiges Ethanol und Wasser aus dem Kopfraum entfernt werden, da sie die in wesentlich geringeren Konzentrationen vorkommenden charakteristischen Bestandteile verdecken.

Ob Nahrung verdorben ist, vermag die menschliche Nase schnell festzustellen – in der Geschichte unserer Art hing das Überleben davon ab. Ob Lebensmittel hingegen durch gesundheitsschädliche Bakterien kontaminiert sind, lässt sich derzeit nur anhand von Probenkulturen im Labor überprüfen, und das kostet Arbeit und Zeit. Technische Nasen, die mit verschiedenen Sensoren bestückt waren, bewiesen ihre Tauglichkeit bereits bei der Überprüfung der Frische von Eiern, Rind- und Lammfleisch, Äpfeln und Gemüse. Angenehm für die Verbraucher: Ob Tomaten oder Äpfel reif waren, ließ sich so ebenfalls ermitteln.

Auch zur Prozesskontrolle von Industrie- oder Abfallanlagen bieten sich Sensoren an, wie Tests auf einer Müllkippe, einer Kompostieranlage, in einer Fleischfabrik und einer Kläranlage bewiesen haben. Eine Trainingsphase war dabei stets entscheidend für den Erfolg.

Elektronische Nasen können auch lebensbedrohliche Konzentrationen giftiger Gase wie Kohlenmonoxid und Stickstoffdioxid feststellen. Zwar zeigten Studien, dass Wasserdampf sie im Lauf der Zeit unbrauchbar macht. Kenneth Suslick und seine Mitarbeiter konnten das aber mit hydrophoben kolorimetrischen Sensoren umgehen. Ihre künstliche Nase vermochte 20 toxische Chemikalien zu unterscheiden – selbst bei Konzentrationen, die noch unter den gesetzlichen Schwellenwerten lagen. Das Gerät war etwa einen Quadratzentimeter groß und wurde mit einem kleinen, mobilen Scanner ausgewertet.

Sicherheitsexperten erhoffen sich von dieser Technik neue Wege, Explosivstoffe und Nervengifte aufzuspüren. Das ist eine große Herausforderung: Die Kunstnase muss binnen Sekunden reagieren und die gefährlichen Substanzen, sofern sie vorhanden sind, mit hoher Zuverlässigkeit entdecken, ohne falschen Alarm auszulösen. Dabei gasen die fraglichen Stoffe meist nur im unteren ppb-Bereich aus. Doch unser Fluoreszenzsystem vermag den militärischen Sprengstoff Dinitrotoluol (DNT) über kontaminiertem Erdreich bereits bei Werten von 120 ppb auszumachen. Im Labor konnte das System der zweiten Generation ein Nervengift mit einer hohen Trefferquote identifizieren: Tatsächlich war

Kommerzielle Versionen von künstlichen Nasen gibt es in vielen Formen und Größen; sie werden in ganz unterschiedlichen Situationen genutzt. Die wichtigste Anwendung ist wohl die öffentliche Sicherheit. Hier fahndet ein Feuerwehrmann nach Spuren von Brandbeschleunigern, die auf ein Verbrechen hindeuten würden.

Thema Nanotechnologie bei Spektrum der Wissenschaft

Neu!

Als PDF direkt in Ihr Postfach

Lassen Sie sich schnell und kompakt über die wichtigsten Erkenntnisse im Bereich Nanotechnologie informieren! **Briefings Nanotechnology** erscheint monatlich digital und in englischer Sprache.

spektrum.com/briefings

SPEKTRUM-SPEZIAL – PHYSIK • MATHEMATIK • TECHNIK 1/2012

»Einblicke in die Nanowelt«

Die Nanotechnologie ist unaufhaltsam auf dem Vormarsch und wird das 21. Jahrhundert prägen. Schon heute hat sie Eingang in unseren Alltag gefunden. Dieses **Spektrum-Spezial** bietet eine Sammlung wichtiger Artikel zum Thema Nanotechnologie aus **Spektrum der Wissenschaft**, die schlaglichtartig den aktuellen Stand und die Zukunft dieses Gebiets beleuchten – und wie es unser aller Leben beeinflussen wird.

spektrum.de/spezialabo

Themenseite »Nanotechnologie«

Hier finden Sie eine Zusammenstellung der wichtigsten Beiträge aus den Magazinen und Onlineberichten des Verlags rund um das Thema Nanotechnologie.

www.spektrum.de/nano

das Toxin beziehungsweise ein für Studien geeigneter ungefährlicher Ersatz nur in etwa 50 von 17 700 über zwei Wochen hinweg getesteten Gasproben vorhanden. Auch Dieselkraftstoff findet das Sensorarray verlässlich – er ist oft Bestandteil improvisierter Sprengkörper.

Die Gruppe von Lewis trainierte ihre Kompositpolymersensoren erfolgreich für Ersatzstoffe von DNT und Nervengiften. Lal Pinnaduwage und seine Kollegen am Oak Ridge National Laboratory in Tennessee fanden heraus, dass Mikrobalkengeräte Explosivstoffe schon in Konzentrationen von Teilen pro Billion (parts per trillion) entdecken – innerhalb weniger Sekunden. Zudem blieb das Messverhalten über ein Jahr hinweg stabil. Einige Studien zeigten auch, dass Kohlenstoffnanoröhren dank ihrer großen Oberfläche und ihrer elektronischen Eigenschaften ebenfalls für die Sicherheitstechnik taugen.

Schließlich gäbe es auch in der medizinischen Diagnostik Aufgaben für elektronische Nasen – als Alternative etwa zum Zeit raubenden Anlegen von Kulturen, um Infektionen nachzuweisen. Aus klinischen Studien ist bekannt, dass Geruchssensoren auf der Basis leitfähiger Polymere den Erreger *Helicobacter pylori* – Mitverursacher von Magengeschwüren – in Atemproben und das *Mycobacterium tuberculosis* in Speichelproben identifizieren. Darüber hinaus ließen sich einige Mikroben, die Harnwegsinfekte hervorrufen, im Kopfraum über dem Urin der Patienten nachweisen. Weil Lungenbläschen mit dem Blut flüchtige Verbindungen austauschen, können künstliche Nasen Unterschiede zwischen Gesunden und Diabetes- sowie Lungenkrebspatienten in deren Atemluft erschnuppern, vielleicht sogar verschiedene Stadien dieser Tumorerkrankung differenzieren.

Die Aufzählung möglicher Anwendungen zeigt nicht nur das Potenzial auf, sondern auch die großen Probleme. Für Unternehmen wird dieser Markt erst dann lukrativ, wenn Sensortypen universell einsetzbar sind und damit in großen Mengen nachgefragt werden, doch ist dies nach bisherigem Kenntnisstand ausgeschlossen. Und selbst wenn es gelänge, beispielsweise für die Lebensmittelindustrie ein Sensorarray aus Feldeffekttransistoren zu bauen, das für alle Nahrungsmittel und Prozessschritte geeignet wäre, müsste jedes Gerät doch für jede Anwendung eigens geeicht, also trainiert werden. Das Trainingsergebnis als Datensatz auf ein anderes System zu übertragen, was bei gleichartigen Einsatzbedingungen viel Zeit sparen würde, ist noch nicht ohne Weiteres möglich – und das behindert die massenhafte Verbreitung.

Zudem sollten Nutzer wissen, was die Systeme können und was nicht, um keine falschen Erwartungen zu hegen. Denn letzten Endes gibt es doch einen großen Unterschied zwischen biologischen und elektronischen Nasen: Erstere können Substanzen, die gemeinsam auftreten, einzeln identifizieren, wie auch ein Gaschromatograf oder ein Massenspektrometer ein komplexes Gemisch in seine Komponenten aufzutrennen vermag. Eine künstliche Nase hingegen erkennt nach entsprechendem Training lediglich das Gemisch in einer Probe und seine Konzentration. Obendrein trennen die biologischen Vorbilder und ihr technisches Analogon Welten hinsichtlich der Messempfindlichkeit: Während sie bei Letzterem im Bereich von ppm liegt, nimmt der im Verlauf der Evolution geschärfte natürliche Geruchssinn noch millionstel ppm wahr.

Biotechnologische Ansätze könnten hier weiterhelfen. Erst 2007 gelang es der Arbeitsgruppe des Zellbiologen Danny Dhanasekraran von der Temple University School of Medicine in Philadelphia, Hefezellen genetisch so zu modifizieren, dass sie sich ähnlich wie Riechzellen verhalten: Sie produzieren Rezeptormoleküle, die sie auf ihrer Oberfläche präsentieren, und senden ein biochemisches Signal, wenn ein Duftstoff die passende »Tasche« besetzt. Statt eine Abfolge elektrischer Potenziale wird hier ein fluoreszierender Farbstoff aktiviert. Mit dieser Methode hoffen die Forscher, ebenfalls eine große Bandbreite an Substanzen nachweisen zu können.

Gelingt es, einige dieser Probleme zu lösen, bieten künstliche Nasen einmalige Möglichkeiten, Gase zu erkennen und über elektronische Verbindungen Reaktionen in die Wege zu leiten – von der Sicherheitsüberwachung in U-Bahn-Stationen bis zur Prozessüberwachung im heimischen Backofen: Wenn der Kuchen den richtigen Duft verströmt, darf die elektronische Nase den Strom abschalten. ~

DIE AUTOREN

David R. Walt lehrt Chemie an der Tufts University in Boston (Massachusetts). Seine Forschungsschwerpunkte sind neue Werkzeuge zur Untersuchung einzelner Moleküle und Zellen etwa zur Detektion pathogener Stoffe. Die Chemikerin **Shannon E. Stitzel**, Assistenzprofessorin an der Towson University in Baltimore (Maryland), entwickelt Sensoren zur Überwachung der Wasserqualität. **Matthew J. Aernecke** ist Mitglied der Forschungsgruppe für chemische, biologische und Nanotechnologien am MIT Lincoln Laboratory in Lexington (Massachusetts) und Experte für gasempfindliche Mikrosensoren.

QUELLEN

Boeker, P. : Elektronische Nasen: das methodische Konzept und seine Problematik. Teil 1: Einführung und Problemlage. In: Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 70, S. 314–320, 2010

Boeker, P. et al.: Methodik und Technik der Online-Geruchsmessung. In: Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 63, S. 283–289, 2003

Radhika, V. et al.: Chemical Sensing of DNT by Engineered Olfactory Yeast Strain. In: Nature Chemical Biology 3, S. 325–330, Juni 2007

Stitzel, S. E. et al.: Artificial Noses. In: Annual Review of Biomedical Engineering 13, S. 1–25, 2011

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1152358**

© American Scientist
www.americanscientist.org

Lisa Randall
Die Vermessung des Universums
Wie die Physik von morgen
den letzten Geheimnissen auf der Spur ist
Aus dem Englischen von Jürgen Schröder.
S. Fischer, Frankfurt am Main 2012.
492 S., € 24,99

PHYSIK

Rundumschau mit Schwächen

Die prominente Physikerin hat durchaus Interessantes zu sagen, verpackt es aber in einen übermäßigen Wortschwall.

Lisa Randall hat offenbar Freude am Schreiben gefunden. 2005 machte sie mit dem Buch »Verborgene Universen« (»Warped Passages«) auf sich aufmerksam (Spektrum der Wissenschaft 2/2007, S. 100), zwei Jahre später folgte »There is Another Dimension«. Nun legt sie ein neues umfangreiches Werk vor mit dem poetischen Originaltitel »Knocking on Heaven's Door«.

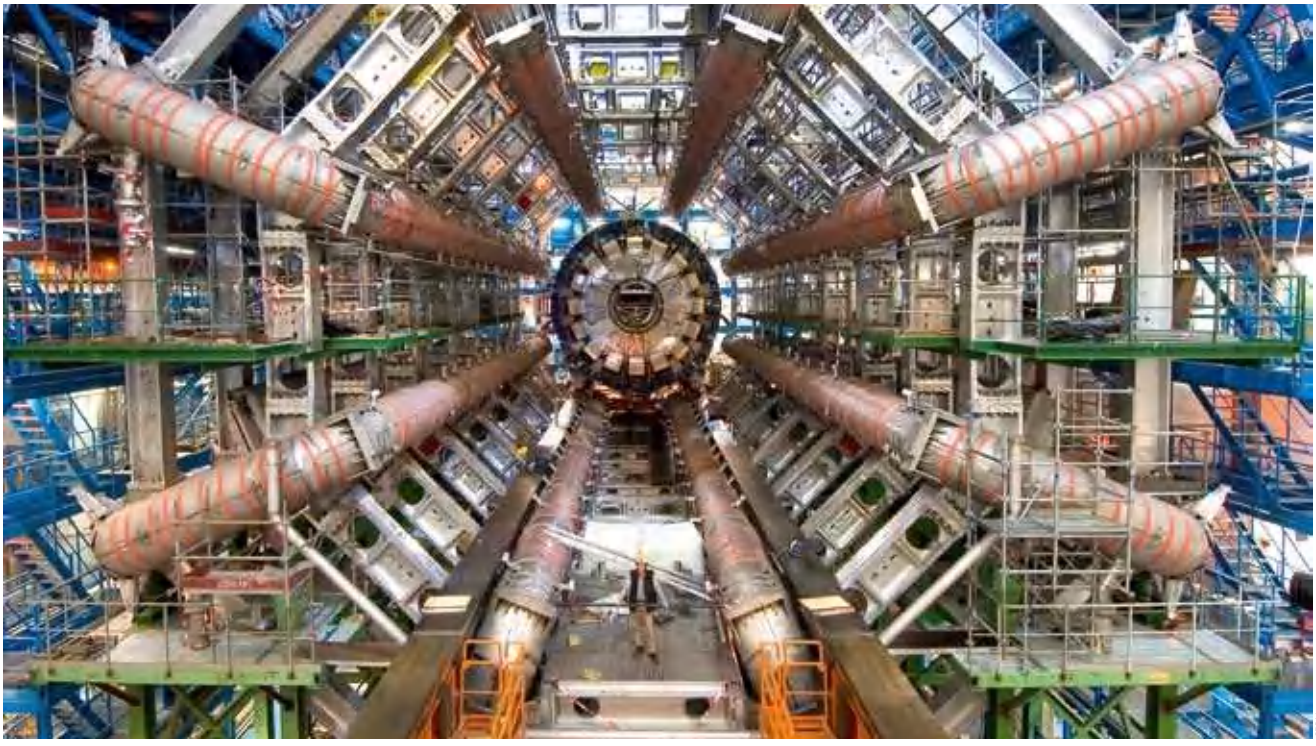
Randall arbeitet als theoretische Physikerin an der Harvard University und befasst sich mit Teilchenphysik, Stringtheorie und Kosmologie. Insbesondere untersucht sie, wie sich das Standardmodell der Teilchenphysik erweitern lässt, um grundlegende Fragen der heutigen Naturwissenschaft zu beantworten: Woher bekommen Elementarteilchen ihre Masse? Warum ist die Gravitation so schwach, verglichen mit den anderen fundamentalen Wechselwirkungen? Woraus besteht Dunkle Materie? Kann die Supersymmetrie helfen, ungelöste Probleme der Teilchenphysik zu überwinden?

Aufsehen erregte Randall vor allem mit ihren Modellen, die zusätzliche räumliche Dimensionen enthalten. Diese blieben uns verborgen, weil sie winzig klein aufgerollt oder verzerrt seien oder weil wir uns auf dreidimensionalen Flächen (so genannten Branen) in einem höherdimensionalen Raum befänden. Lege man solche Annahmen zu Grunde, schreibt sie, ließen sich einige Probleme der Theorie lösen, etwa die rätselhafte Schwäche der Gravitation.

In »Verborgene Universen« hatte sich Randall noch auf die Physik konzentriert, war detailliert auf Modelle und Theorien eingegangen. In ihrem neuen Buch versucht sie sich dagegen an einer Rundumschau. Sie erklärt, warum Naturwissenschaft wichtig ist und wie Forscher denken und arbeiten, sie unternimmt Exkursionen in die Wissenschaftsgeschichte und schildert, wie Physiker zu immer kleineren und auch immer größeren Skalen vorstoßen.

Große Teile des Buchs befassen sich mit dem Large Hadron Collider (LHC) bei Genf, dem leistungsfähigsten Teilchenbeschleuniger der Welt (Bild unten).

Diesen Hohlraum füllt inzwischen der ATLAS-Detektor des LHC. Die auffälligen Röhren sind supraleitende Magnetspulen, die den Weg der gesuchten Elementarteilchen krümmen.



CERN

Randall beschreibt, wie er aufgebaut ist und funktioniert und was Forscher sich von ihm erhoffen: etwa die Entdeckung des Higgs-Bosons, Hinweise auf die Dunkle Materie und Belege für supersymmetrische Teilchen oder zusätzliche Raumdimensionen. Am Ende unternimmt sie einen Ausflug in die Kosmologie. Diese Abschnitte sind interessant, aufschlussreich und bieten einen guten Überblick.

Leider muss der Leser sich bis dahin durch mehr als 200 Seiten arbeiten, aus denen nur schwer eine klare Aussage zu extrahieren ist. Randall versucht dort zu erläutern, was die Naturwissenschaft besonders macht, was empirisches Arbeiten auszeichnet und wie es historisch entstanden ist. Dabei mäandert sie – weitschweifig und redundant – zwischen autobiografischen Episoden, geschichtlichen Rückblicken, essayistischen Abschnitten und dem Schildern von Gesprächen und Vorträgen, bei denen sie zugegen war. Streckenweise verfällt das Buch in einen ausgeprägten Nominalstil mit stark verschachteltem Satzbau, der das Verständnis deutlich erschwert – möglicherweise eine Folge der Übersetzung.

In der Gesamtschau ergibt sich der Eindruck eines Buchs, das zwar einen interessanten Kern besitzt, diesen aber hinter einem dicken Wortpolster versteckt.

Frank Schubert

Der Rezensent ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Werner Bartens
Glücksmedizin
Was wirklich wirkt
Droemer, München 2011. 318 S., € 19,99

MEDIZIN

Verkroampf di net!

Oder: Immer schön locker bleiben, auch beim Gesundheitsverhalten.

Anbieter von Wellness vermitteln ihren Kunden das Gefühl, nur noch gesund auf Probe zu sein. Ernährungsberater rufen mal hü, mal hott und sollten besser gar keine Empfehlungen mehr geben. Pharmafirmen erfinden einen Haufen Prä-Erkrankungen, um ihren Umsatz zu steigern.

Das ist die Meinung von Werner Bartens, der als Arzt in Klinik und Forschung gearbeitet hat und seit 1997 als Wissenschaftsredakteur bei der »Süddeutschen Zeitung« tätig ist. Er hat zahlreiche Sachbücher zum Thema Gesundheit geschrieben und ist gern gesehener Talkshowgast. Den von Diät-, Wellness- und Pharmaindustrie propagierten Gesundheitsdogmen steht er sehr kritisch gegenüber. Deren Kampagnen würden den Menschen einreden, wer gesund bleiben wolle, müsse sporteln, abnehmen, Vitamine schlucken, entschlacken, acht Stunden schlafen, davon möglichst viel vor Mitternacht, keinen Alkohol trinken und vieles mehr. Dabei komme eines zu kurz, nämlich das Gesundsein.

Mit insgesamt 331 »Tatsachen« möchte Bartens seinen Lesern zu einem entspannteren und gesünderen Leben verhelfen. Als Beleg zieht er zahlreiche international anerkannte Publikationen heran, die zum Beispiel zeigen, dass Menschen mit leichtem Übergewicht und mäßigem Alkoholgenuss gesünder leben als idealgewichtige Abstinenzler. Dass sie auch deutlich gesünder leben als Fettleibige und maßlose Trinker, sagt er nicht ausdrücklich; immerhin stellt er keinen Freifahrtschein für hemmungslose Völlerei und Trunksucht aus.

Das Buch referiert eine ansehnliche Sammlung wissenschaftlicher Studien. Wer sich allzu bewusst ernährt, gewaltsam Sport treibt und krampfhaft auf seine Gesundheit achtet, findet hier viele gute Gründe, sich das Leben zu erleichtern. Dem überzeugenden Literaturverzeichnis zum Trotz jubelt uns Bartens jedoch hier und da auch nicht belegte Meinungen als Tatsachen unter. Ausgerechnet für das sehr interessante Kapitel über »gute Gefühle« bietet er nur einen einzigen Beleg, und zwar sein eigenes Buch »Körperglück«. Die Zusammenfassung am Ende jedes Kapitels entspricht nicht immer dem zugehörigen Text, sondern bringt zuweilen Punkte, die anderswo oder gar nicht vorkommen. Die Internetadresse, unter der man Bartens schreiben soll, was sonst noch hilft, ist nicht, wie im Buch abgedruckt, www.waswirklichwirkt.de, sondern www.werner-bartens.de.

Immer wieder greift der Autor die enorm gesundheitsfördernde Kraft von Glücksgefühlen und Lebenszufriedenheit auf. Tatsächlich gefährdet Einsamkeit unser Leben in doppelt so hohem Maß wie Übergewicht, und emotionale Belastungen erhöhen das Herzinfarktrisiko fast ebenso stark wie Rauchen und sogar mehr als Diabetes oder Bluthochdruck. Dennoch wird dieser Gesundheitsfaktor in der Öffentlichkeit, der Forschung und der ärztlichen Praxis praktisch nicht beachtet.

Die Botschaft des Buchs ist nach den ersten zwei Kapiteln klar: Achte auf genügend Schlaf, gute Beziehungen, Zufriedenheit im Job, Essen und Bewegung nach Lust und Laune, und vor allem: Entspann dich! Tu, was dir guttut, und dir geht es gut. Fixiere dich nicht zu sehr auf das Einhalten bestimmter Lebensstilfaktoren, sondern achte mehr auf das persönliche Wohlgefühl dabei. Sport und gesund essen nütze nichts, solange man dabei keinen Spaß habe. Was also wirklich wirkt? Alles, was man

mit Freuden tut. Wie man allerdings das viel gepriesene Glück im Leben findet, kann einem auch dieses Buch nicht erzählen.

Dagegen ist Stress in jeder Hinsicht unbekömmlich, wie viele Untersuchungen bestätigen. Wundheilung, Infekte, Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Schmerzen oder Krebs – alles wird durch Stress schlimmer. Und alles, was zu psychischer Stabilität und Heiterkeit führt, ob Topfpflanzen, leckeres Essen oder gute Freunde, fördert die Gesundheit.

Das ist gut und richtig, aber nicht wirklich neu. Mit seinen zahlreichen, teils redundanten Ratschlägen am Ende jedes Kapitels reiht sich das Buch ein in die endlose Liste viel gekaufter und wenig umgesetzter Ratgeberliteratur – und unterscheidet sich nicht sonderlich von den von Bartens geschmähten esoterischen oder fernöstlichen Lebenshilfe-Ratgebern.

Das Buch ist hilfreich für jeden, der sich bei nächster Gelegenheit an einem kalten regnerischen Abend mit gutem Gewissen für die ungesunde Couch und gegen das gesunde Joggen entscheiden und mal wieder mit Appetit seine kalorienreiche Lieblingsspeise statt eines gehaltvollen Biosalats verzehren möchte. Es wendet sich definitiv nicht an jene, die mangels Bildung oder Geld sowieso keinen Zugang zu einem gesünderen Leben finden; die aber machen den Großteil der in deutschen Praxen behandelten Patienten aus.

Das Buch ist ansprechend geschrieben und leicht zu lesen. Wer allerdings zu den eher verbissenen Aktivisten zählt, muss sehr viel Humor aufbringen, um die etwas polemisierenden und pauschalisierenden Passagen über diverse Gesundheitspraktiken amüsant zu finden. Letztlich zeigen aber auch die von Bartens zitierten Studien: Gesundheitsbewusstes Verhalten zahlt sich im Alter aus – selbst wenn es jetzt gerade nicht wirklich Spaß macht.

Tanja Neuvians
Die Rezensentin hat in Medizin und Tiermedizin promoviert und arbeitet als freie Wissenschaftsjournalistin in Ladenburg.

Matthias Bloechle
Vom Recht auf ein gesundes Kind
Ein Plädoyer für die PID – Präimplantationsdiagnostik
Irisiana, München 2011. 208 S., € 19,99

ETHIK

Recht und Unrecht beim Kinderwunsch

Ein Frauenarzt erzwingt durch eine Selbstanzeige die gerichtliche Klärung der Streitfrage um die Auswahl gesunder Embryonen. Aber die gesellschaftliche Diskussion darüber dauert an.

Manche Paare müssen befürchten, dass ein von ihnen gezeugtes Kind unter einem schwer wiegenden genetischen Defekt leiden wird. Um ihnen aus dem dadurch ausgelösten Dilemma zu helfen, hat die Medizin ein Verfahren erfunden, dessen Name »Präimplantationsdiagnostik« (PID) so monströs ist wie die darüber bisweilen fundamentalistisch geführte öffentliche und juristische Debatte. PID ist eine Methode, um nach der künstlichen Be-

LESERSHOP

Jahrgangs-CD-ROM SdW 2011

Die CD-ROM bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bildern) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Diese sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche ab der Erstausgabe 1978. Die CD-ROM läuft auf Windows-, Mac- und Unix-Systemen (der Acrobat Reader wird mitgeliefert).
Des Weiteren finden Sie das **Spektrum.de**-Archiv mit zirka 11 000 Artikeln. **Spektrum.de** und das Suchregister laufen nur unter Windows.
Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,– (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland);
ISBN 978-3-941205-92-5

spektrum.com/recherche

Spektrum DER WISSENSCHAFT
WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

David Shenk

Das Genie in uns. Neue Erkenntnisse über Begabung und Intelligenz

Aus dem Englischen von Jens Hagestedt. Hoffmann und Campe, Hamburg 2012. 460 S., € 24,99

Sie wären auch gern ein bewundertes Genie wie Mozart, Shakespeare oder Einstein? Tja, Sie haben es vermasselt. Mit genügend Anstrengung, Durchhaltevermögen und der frühen Förderung im Elternhaus hätten Sie es werden können. Das ist die traurige Erkenntnis nach der Lektüre dieses Buchs. Angeborenes Talent oder Begabung gibt es nicht, jeder Mensch kommt mit den gleichen Möglichkeiten zur Welt, er muss sie nur nutzen. Diese an sich tröstliche These belegt der renommierte amerikanische Sachbuchautor mit einer Fülle wissenschaftlicher Befunde. Untersuchungsergebnisse, die auf den ersten Blick das Gegenteil beweisen, zerpflückt er höchst geschickt und so überzeugend, dass man am Ende denkt: Vielleicht hat er ja wirklich Recht. Und doch mag sich angesichts der eigenen Lebenserfahrung der letzte Glaube nicht einstellen. Sind die eingefleischten Vorurteile einfach zu übermächtig? GERHARD TRAGESER

Hans-Ulrich Grimm

Leinöl macht glücklich. Das blaue Ernährungswunder

MensSana bei Knaur, München 2012. 174 S., € 17,99

So wie der ehemalige »Spiegel«-Redakteur Grimm es formuliert, hilft Leinöl wegen der darin enthaltenen Fettsäuren gegen praktisch alles: von psychischen Krankheiten bis zu Krebs, von Diabetes bis zu Arteriosklerose. Grimm bemüht gern den suggestiv-reißerischen Stil mancher Anzeigen für medizinische Wunderdrogen; ein halb so hohes Lob würde man ihm eher glauben. Die Kernaussagen trichtert er dem Leser regelrecht ein – weniger Vorteilhaftes, wie den nicht besonders angenehmen Geschmack des Wunderöls, erwähnt er nur kurz nebenbei. Dabei zitiert er durchaus eine Anzahl ernst zu nehmender wissenschaftlicher Studien. Lohnend sind die Ausführungen zur Geschichte des Leinanbaus, zur früher großen Bedeutung der Pflanze – auch als Nahrungsmittel – und zu den wirtschaftlich bedingten, nicht besonders gesunden Ernährungsumstellungen in heutiger Zeit. Zuletzt bekommen wir noch verlockende Küchenrezepte mit Leinöl geliefert. ADELHEID STAHNKE

Tony Crilly

Die großen Fragen. Mathematik

Aus dem Englischen von Roland Girgensohn. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2012. 208 S., € 19,95

Mit seinem abwaschbaren Einband und dem sehr handlichen, zum Fliegenklatschen geeigneten Format wirkt das Buch wie gemacht für den Dschungel oder die einsame Insel. Für das unmittelbare Überleben ist es dagegen weniger relevant: In 20 Kapiteln gibt der emeritierte englische Mathematikprofessor Tony Crilly einen gut und verständlich geschriebenen, repräsentativen Überblick über sein Fach, von den ersten Zahlzeichen bis zu den großen philosophischen Fragen und den aktuellen ungelösten Problemen. Viel Stoff, der nur dank ziemlich kleiner Schrift überhaupt ins Format passt; aber auf der einsamen Insel ist Zeitmangel ja nicht das vorrangige Problem. CHRISTOPH PÖPPE

Vera Rupp und Heide Birley (Hg.)

Landleben im römischen Deutschland

Theiss, Stuttgart 2012. 194 S., € 34,95

Keine andere Kultur der Antike hatte sich so der Urbanität verschrieben wie die römische. Doch ohne ein Umland, das Nahrungsmittel und handwerkliche Produkte lieferte, konnte keine Stadt existieren. 50 Archäologen, von Basel rheinabwärts bis Xanten und westlich des Limes bis Ingolstadt, beschreiben Kleinstädte, Dörfer und Landgüter in den heute zu Deutschland gehörenden Teilen der römischen Nordprovinzen. Porträts wichtiger Fundstätten, manche davon zu Freiluftmuseen ausgebaut, konkretisieren einen breit angelegten Überblick über das Landleben, von der Militärverwaltung und der Struktur von Ortschaften und Gutshöfen über Ackerbau und Viehzucht bis hin zu Religion und Freizeitgestaltung. Manche Ereignisse werden verwirrend oft erwähnt, vor allem Germanenüberfälle, die das Schicksal manches »vicus« besiegelten. Ein kurzer Abriss der provinzialrömischen Geschichte hätte hier dem Laien geholfen, sich besser zu orientieren. KLAUS-DIETER LINSMEIER

fruchtung mehrerer Eizellen solche für die Implantation auszuwählen, die den Defekt nicht in sich tragen.

Dass dies Elternpaaren in ihrem Konflikt helfen kann, ist hinlänglich bewiesen. Deutschland gestattet diese Vorinspektion jedoch bislang nur mit Einschränkungen. Dass in Europa zehn Länder, darunter so katholische wie Spanien und Irland, damit offenbar weniger Probleme haben, hat die Debatte hier zu Lande wenig beeinflusst. Der Berliner Reproduktionsmediziner Matthias Bloechle ist nun jener Arzt, der es nicht hinnehmen wollte, dass eine Methode, die seinen Patientinnen helfen würde, in Deutschland gesetzlich nicht zugelassen ist. »Erblich bedingte Erkrankungen und Todesfälle müssen nicht wiederholt klaglos erduldet werden.« Also zeigte er sich in einem spektakulären Akt selbst wegen Missbildung ertragen könnten. Die Umstände sind für die Frauen offenbar demütigend. Bloechle: »Warum wird sie behandelt wie ein unmündiges Kind? Warum müssen ihr andere hineinreden? Kann sie denn nicht selbst entscheiden, was richtig für sie ist?« Und bei einer anderen Fallgeschichte von einer Mutter, die bereits ein behindertes Kind pflegt und aufzieht: »Wer kommt denn dadurch zu Schaden, wenn sie sich behandeln lässt, um ein gesundes Kind zu bekommen?« Alles Fragen, die einem der gesunde Menschenverstand nahelegt, die aber bei diesem Thema nicht immer eine Rolle spielen.

Bloechle, selbst Vater von fünf Kindern, erzählt auch seinen Werdegang und berichtet über die Motive, die ihn bis zur genannten Selbstanzeige gebracht haben. Ausführlich beschreibt er

Die PID ist zumeist ein letzter verzweifelter Schritt nach vielen schmerzhaften Enttäuschungen

an, um die rechtlichen Fragen von den Gerichten klären zu lassen. Vier Jahre später, 2010, erhielt er vom Bundesgerichtshof die Bestätigung, dass die PID vereinbar mit dem deutschen Gesetz zum Embryonenschutz sei. In der Folge wurde 2011 ein neues Gesetz erlassen, das ihre Grenzen sowie rechtliche Fragen detailliert regelt.

Dennoch ist »die gesellschaftliche Auseinandersetzung nicht beendet« – Grund genug für Bloechle, in diesem Buch nochmals nachdrücklich und sehr persönlich sein Anliegen vorzubringen, das natürlich die ganze Gesellschaft angeht. In drei Teilen – Medizin, Justiz, Politik – handelt er die wesentlichen Seiten des Themas ab. Dazwischen schiebt er immer wieder echte Fallgeschichten aus der eigenen Praxis ein.

Für ein Paar mit unerfülltem Kinderwunsch ist die PID zumeist ein letzter verzweifelter Schritt nach vielen schmerzhaften Enttäuschungen. Es lohnt sich, Bloechles Patientengeschichten zu lesen. Man kann sie als anekdotisch abtun – oder eben zugestehen: Das sind Betroffene, die beispielsweise keinen dritten Schwangerschaftsabbruch die medizinische Prozedur bei der In-vitro-Fertilisation sowie die Genetik der Fortpflanzung. Spannender jedoch finde ich seinen Bericht über die Gesetzgebung rund um das Embryonenschutzgesetz sowie den Verlauf des Verfahrens von der Selbstanzeige bis zum höchstrichterlichen Urteil. Verblüffend, wie ein Gesetz, das eigentlich verhindern soll, dass Fortpflanzungstechniken missbräuchlich angewendet werden, gerade bei der PID (auch wenn es nur um wenige hundert Fälle pro Jahr geht) zum Unglück vieler Paare wird.

Dass ihnen, wie vor Jahrzehnten beim Abtreibungstourismus nach Holland, auch hier die Reise in ein Nachbarland offensteht, stellt Ethiker, Politiker und Gesetzgeber vor ein interessantes Dilemma. Denn natürlich würde niemand daraus ableiten, so Bloechle, »dass diese Staaten Unrechtsstaaten seien, in denen durch den dort anders geregelten Umgang mit menschlichen Embryos die Menschenwürde mit Füßen getreten wird«. Wie aber kann dann das, was dort Recht ist, hier zu Lande Unrecht sein?

Die letztlich für den Frauenarzt positive richterliche Entscheidung war für ihn begreiflicherweise »eine große Erleichterung«. Wie der Streit und die Debatte darüber dennoch weitergehen, berichtet er im dritten Teil »Politik« – ein ernüchternder bis erschütternder Kommentar zur moralisch-ethischen Verfasstheit unserer Gesellschaft am Beispiel einer existenziellen Frage.

Inwieweit ist es Teil der reproduktiven Freiheit der Menschen, Embryonen oder Föten nach bestimmten Merkmalen auszuwählen? Dem Autor sind die üblichen Totschlagargumente geläufig: Durch PID entstehe ein gesellschaftlicher Druck hin zum »Designerbaby« und eine Abwertung aller nichtperfekten Kinder; es gebe kein »Recht auf ein gesundes Kind«; oder die PID sei der erste Schritt auf dem Weg zu einer Selektion von lebensunwertem Leben im Geist des Holocaust.

Da ist es zumindest erhellend, wenn Matthias Bloechle jüdische Stimmen zur PID zitiert. Ein Rabbiner aus Düsseldorf äußert sich so: »Nach jüdischem Recht gilt: Wer der künstlichen Befruchtung zustimmt, muss auch PID zulassen.« Die Wissenschaftsethikerin Tatjana Tarkian von der Universität Erfurt empfahl PID-Befürwortern kürzlich, darauf hinzuweisen, dass es hier um die Frage geht, »ob die Rechtsordnung es Paaren mit Kinderwunsch und genetischem Risiko verwehren sollte, eine Chance auf ein gesundes Kind ergreifen zu können, ohne dabei die Möglichkeit eines Schwangerschaftsabbruchs in Kauf nehmen zu müssen.«

Wer wie Bloechle so weit ging, sich potenziell selbst zu inkriminieren, wird bewegt von der bisweilen unmenschliche Weltferne, die sich durch die deutsche PID-Debatte zieht. »Menschen, die keine Erfahrungen mit dem Tod von ungeborenen und geborenen Kindern haben, tun sich oft leicht damit, ein Verbot der PID zu fordern. Wer jedoch individuelle Geschichten vom einzelnen betroffenen Menschen kennt, wird sich schwertun, anderen ihr Recht auf ein gesundes Kind zu verwehren.«

Reinhard Breuer

Der Rezensent ist Editor-at-Large bei »Spektrum der Wissenschaft« und kinderlos.

Dirk Eidemüller
Das nukleare Zeitalter
Von der Kernspaltung bis zur Entsorgung
Hirzel, Stuttgart 2012. 184 S., € 19,80

KERNENERGIE

Grundlagen für eine unmögliche Diskussion

Sachliche Information ist gerade bei diesem hochkontroversen Thema dringend geboten – etwas weniger staubtrocken präsentiert wäre sie noch hilfreicher.

Diskussionen scheitern häufig daran, dass es den Diskutanten zwar nicht an Engagement, aber dafür an grundlegendem Wissen mangelt. Gerade bei prominenten Themen hat auf Grund der Berichterstattung aller Medien jeder eine Meinung, bei komplexen Sachverhalten aber oft nur minimale Informationen.

Kernenergie ist im Kontext von Politik, Kriegen, Energiegewinnung, Klimawandel und Langzeitfolgen extrem komplex. Gerade deshalb ziehen sich Befürworter wie Gegner gerne auf einfache Standpunkte zurück – mit der unangenehmen Folge, dass von dort aus keine sachliche Auseinandersetzung mehr stattfinden kann.

In »Das nukleare Zeitalter« setzt sich Dirk Eidemüller zum Ziel, »zu einer nüchternen Abwägung der gesellschaftlich relevanten Aspekte der Kernenergie beizutragen«, mit Betonung auf »nüchtern«. Der studierte Kern- und Teilchenphysiker hat das Buch mit einer thematisch geordneten Literaturliste, einem Glossar und einem Sachwortverzeichnis ausgestattet, es ist somit durchaus auch als Nachschlagewerk geeignet.

Ein Jahr nach Fukushima strahlt die Atomdebatte wieder kräftig in die Gesellschaft. Beide Seiten haben gültige Totschlagargumente: Die Gegner weisen mit Recht darauf hin, dass radioaktiver Müll der Menschheit noch für Jahrtausende eine Bürde auferlegt, die nur schwer zu rechtfertigen ist. Die Befürworter haben auf ihrer Seite, dass drei Kilogramm Uran so viel Energie liefern wie 8000 Tonnen Braunkohle und dabei kaum klimaaktives CO_2 ausstoßen. Da Kohle im Übrigen ebenfalls geringe Mengen radioaktiven Materials enthält, stößt ein Kohlekraftwerk im Normalbetrieb in etwa gleich viel Strahlung aus wie ein Kernkraftwerk.

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: **www.science-shop.de**
per E-Mail: **shop@wissenschaft-online.de**
telefonisch: **06221 9126-841**
per Fax: **06221 9126-869**

Ist es bei dieser Ausgangslage tatsächlich hilfreich, beim Aufbau des Atoms zu beginnen, Energiegewinnungsformeln wiederzugeben und den Aufbau der Reaktortypen im Detail vorzustellen? Der Autor sieht es jedenfalls so, und bei der Lektüre aufblitzende Zusammenhänge bestätigen ihn: Spätestens wenn es darum geht, ob abgebrannte Brennstäbe wiederaufbereitet oder endgelagert werden sollen, merkt der Leser, dass der gedankliche Weg von grundlegenden Kenntnissen zu weit reichenden Entscheidungen erstaunlich kurz ist. Solche Zusammenhänge sind eben nur zu erkennen, wenn die Grundlagen vorgestellt werden.

»Das nukleare Zeitalter« hält neben den Basics durchaus auch überraschende Munition für die Gegner bereit, beispielsweise das Versicherungsproblem von Kernkraftwerken: Keines ist gegen einen großen Störfall versichert, da einerseits das Risiko nicht kalkuliert werden kann und andererseits keine Versicherungsgesellschaft für die enormen Schäden im Fall eines GAUs aufkommen könnte. »Für Katastrophen haftet die Gesellschaft.« Die negativen Folgen des Uranabbaus haben in erster Linie indigene Völker zu tragen, 70 Prozent des Abbaus finden auf ihrem Boden statt. Es bleiben ihnen jedoch meist nur die Schäden; den Gewinn machen die Konzerne, die sich den Grund und Boden der meist armen Bevölkerung billig angeeignet haben.

Der Autor schlägt einen sachlichen Ton an; umso irritierender wirken daher die gelegentlich eingestreuten Zeilen, die Meinungsinhalte transportieren – beispielsweise wenn Eidemüller kurz über den Natur- oder Zivilisationsbegriff bei indigenen Völkern spekuliert. Oder wenn er im Abschnitt über Atomwaffen die Spieltheorie auf knappen drei Zeilen abtut und erschreckend oberflächlich über das Gleichgewicht des Schreckens schreibt. Der weitere historische Abriss über die Entwicklung der Atommächte zeigt dann wieder in aller Nüchternheit, dass das nukleare Zeitalter auch lange nach dem Kalten Krieg noch das Potenzial hat, einen explosiven Abgang hinzulegen.

Der Anspruch des Werks ist in jeder Hinsicht lobenswert. Ich bezweifle allerdings, ob ein trockenes Faktenwerk mit der Anmutung eines pädagogisch nicht aufbereiteten Schulbuchs genügend Leser findet, um die Debatte auf ein höheres Niveau zu heben.

Und noch ein Fazit: Mehr über das nukleare Zeitalter zu wissen, ist leider keinesfalls beruhigend.

Jörg Wipplinger
Der Rezensent hat Zoologie studiert; er ist Journalist und Videoblogger (**http://diewahrheit.at**) in Wien.

Naturwissenschaftliches Wissen aus erster Hand für Schulen und Schüler

W I S wissenschaft in die schulen!

AUS DER FORSCHUNG IN DEN UNTERRICHT

Das Projekt Wissenschaft in die Schulen! – eine Investition in die Zukunft

Naturwissenschaften und Technik sind für Oberstufenschüler eine spannende Sache und für den Wirtschaftsstandort Deutschland von fundamentaler Bedeutung. Daher möchten wir gemeinsam mit Ihnen das Interesse der Jugendlichen an diesem Themenbereich wecken und fördern. Wir – das sind der Verlag Spektrum der Wissenschaft, die Gesellschaft für Biochemie und Molekularbiologie, das Max-Planck-Institut für Astronomie, die Landesakademie für Fortbildung und Personalentwicklung an Schulen in Bad Wildbad und das Haus der Astronomie in Heidelberg.
Bisher haben sich schon über 7500 Schüler für WIS angemeldet. Wenn Sie wissen möchten, wie Sie eine Klasse und das Projekt unterstützen können und was es mit WIS auf sich hat, dann finden Sie hier Informationen dazu:
www.wissenschaft-schulen.de

TAUSENDE SCHÜLER SIND SCHON DABEI. TAUSEND DANK AN UNSERE SPONSOREN!

Märkischer Arbeitgeberverband | Großdrebnitzer Agrarbetriebe | Freundeskreis des evang. Heidehofgymnasiums Stuttgart | Freundeskreis des Rudi-Stephan-Gymnasiums | Symbio Herborn Group | NDT Systems & Services AG | Weinmann GmbH | Stadtwerke Düsseldorf | Karl-Möller-Stiftung | Förderverein des Eichenfeldgymnasiums | Kernkraftwerk Isar, Essenbach | HUK Coburg | Verein der Freunde und Förderer des Gymnasiums der Stadt Kerpen | Vollmer Werke Maschinenfabrik GmbH | Förderverein »Freunde des Helmholtzgymnasiums« Zweibrücken | Freundeskreis des Gymnasiums Neuenbürg | Freundeskreis des Hartmanni-Gymnasiums | Sternwarte am Wallgarten

Schaukelnde Steine

Wind und Wetter arbeiteten diesen Klotz aus dem Dolomitgestein des Ithkamms heraus.

»Zu den eigenartigsten und zugleich seltensten Verwitterungsformen der Erdrinde gehören die Wackel- oder Schaukelsteine. Es sind dies harte Felsblöcke, die nur noch mit einer kleinen Fläche einer festen Unterlage aufliegen und durch den Wind oder andere Kräfte in Schaukelbewegungen versetzt werden können. Kaum bekannt ist dagegen, daß wir auch in der Bundesrepublik Deutschland einen schönen großen Wackelstein besitzen. Er liegt knapp 12 km ostwärts von Hameln im nördlichen Tal des Ith, oberhalb der kleinen Gemeinde Bessingen.« Kosmos 7, 1962, S. 298–299

Kommt die Fernseh-Schallplatte?

»Bereits vor Jahresfrist hatten Techniker der NBC ein Magnetophongerät entwickelt, das imstande ist, Bild und Ton von Fernsehsendungen auf Band aufzunehmen und zu reproduzieren. Während dieses ziemlich komplizierte Gerät wegen seines Preises von rund 100 000 Dollar nur für kapitalkräftige Fernsehgesellschaften Bedeutung erlangen dürfte, haben nunmehr zwei italienische Ingenieure einen Plattenspieler entwickelt, der für den bescheidenen Preis von etwa 50 000 Lire in Serie hergestellt werden kann und in Verbindung mit einem Fernsehgerät Bild und Ton abspielt. Die Zahl der Interessenten, die auf diese Art ihre Lieblingssänger zugleich hören und sehen möchten, dürfte Legion sein.« Neuheiten und Erfindungen 321, 1962, S. 125

Tiefe Einblicke

»Das Panoramix-Röntgenverfahren ermöglicht es, sämtliche Organe der Mundhöhle auf einem einzigen Röntgenbild zur Darstellung zu bringen. Mit der Röhre, die in die Mundhöhle eingeführt wird, ist es nicht nur möglich, die ganzen Zahnreihen des Ober- und Unterkiefers darzustellen, sondern auch das komplizierte Knochengerüst des Gesichtsschädels mit den zahlreichen Hohlräumen, die Infektionen besonders ausgesetzt sind, genauer zu untersuchen.« Neuheiten und Erfindungen 321, 1962, S. 125

Tödlicher Mief

»Das Aussehen der neuen grossstädtischen Strassen ist ein anderes geworden gegen vor 30 bis 40 Jahren, aber in hygienischer Beziehung haben sie noch Mängel. Die Wohnungen leiden meist an dem grossen Übelstande, dass sie nicht durchlüftbar sind. Auf Grund vorsichtig gewählten Materials hat sich ergeben, dass die Sterblichkeit in den nichtdurchlüftbaren Wand- an Wandhäusern um 15 Prozent höher ist als in den durchlüftbaren. Der Unterschied steigt bis auf 20 Prozent, wenn die Wand- an Wandhäuser in lang fortlaufenden Strassenzügen stehen. Diese Feststellungen sind Veranlassung gewesen, dass in England durch eine Vorschrift von 1909 die Einrichtung von Wohnungen nach diesem als gesundheitsschädlich erkannten Bautypus verboten ist.« Gesundheit 13, 1912, S. 406–407

Ahnenkult um Robert Koch

»Kürzlich hat in Tokio eine Gedenkfeier für Robert Koch stattgefunden, die von der hohen Verehrung der Japaner für den Meister ein beredtes Zeugnis ablegt. Die Gegend in Tokio, wo das Institut für Infektionskrankheiten steht, wird Shirokane genannt. Hier im Vorgarten des Instituts steht der Koch-Tempel. An der Vorderseite aus schönem japanischen Holz befindet sich ein Bildnis von Koch. In den steinernen Unterbau ist ein Kupferkästchen eingemauert, in welchem eine Anzahl von Kochs Haupthaaren aufbewahrt wird.« Die Umschau in Wissenschaft und Technik 31, 1912, S. 661–662

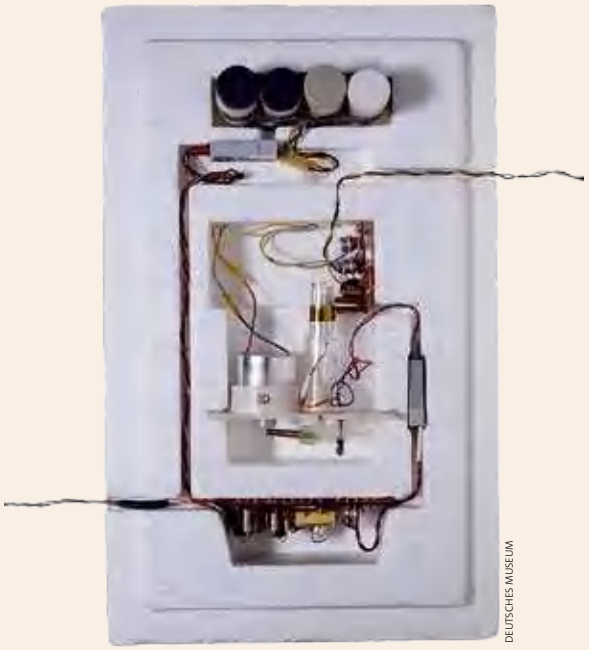
Japanischer Tempel für den Pionier der Bakteriologie

Bewegung stört Vogelgesang

»So haben die Singvögel, die während ihres Gesangs eine ruhige Haltung einnehmen, wie Nachtigall, Singdrossel, Schwarzamsel, die Schönheit ihrer Melodie zur höchsten Vollendung gebracht. Laubsänger und Fliegenfänger, die unter Platzwechsel singen, stehen ihnen an Fülle und Kraft der Stimme nach. Auch Vögel, die, wie Lerchen, ihren Gesang mit einem Balzflug verbinden, tun dies auf Kosten ihres Gesangs.« Prometheus 1186, 1912, S. 672

AUS ZEITSCHRIFTEN DER FORSCHUNGSBIBLIOTHEK FÜR WISSENSCHAFT- UND TECHNIKGESCHICHTE DES DEUTSCHEN MUSEUMS

Meilenstein der Klimaforschung – die Ozonsonde OSE



An einem Wetterballon stieg 1985 die Ozonsonde der DDR-Antarktisstation in die Stratosphäre auf und bestimmte erstmals die vertikale Verteilung des Ozons. Die Messungen bestätigten den Verdacht, dass die Ozonschicht während des Polarfrühjahrs schwindet – und stärkten das Renommee der DDR-Forschung.

Von Daniela Zeibig

Hoch oben in der Stratosphäre, 10 bis 17 Kilometer über dem Erdboden, beginnt die Ozonschicht, benannt nach dem Molekül aus drei Sauerstoffatomen, das dort entsteht und vergeht. Dass es dabei die besonders energiereichen und damit für das Leben auf der Erde schädlichen Frequenzen ultravioletten Lichts absorbiert, geriet in den 1970er Jahren in die öffentliche Diskussion: Flugzeugabgase, vor allem aber die in Spraydosen und Kühlschränken massenhaft eingesetzten Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKWs) kamen unter Verdacht, Ozon abzubauen. Am 16. Mai 1985 berichteten Forscher der britischen Antarktisstation Halley Bay schließlich über einen drastischen Ozonschwund während des Polarfrühjahrs, also in den Monaten September bis November.

Die Briten hatten ihre Messungen mit einem Dobson-Spektrometer von der Erdoberfläche aus vorgenommen: Das Gerät vergleicht die Intensität der energiereichen UV-B- mit jener der harmloseren und vom Ozon kaum beeinflussten UV-A-Strahlung – ohne die Sauerstoffverbindung müssten beide gleich groß sein.

Diese Methode verriet allerdings nicht, in welcher Höhe genau die Ozonschicht beschädigt war. Die Deutsche Demokratische Republik nutzte die Chance, internationales Renommee zu erlangen: Am 22. Mai 1985 ließ der ostdeutsche Antarktisforscher Peter Plessing eine von ihm entwickelte Ozonsonde, kurz OSE genannt, an einem Wetterballon aufsteigen. Erstmals erschloss sich damit die vertikale Verteilung des Gases in der südpolaren Atmosphäre bis in eine Höhe von 35 Kilometern; Zeitreihen zeigten zudem jahreszeitliche Veränderungen auf.

Plessing setzte ein 1959 von den Klimatologen Alan W. Brewer und James Milford an der University of Oxford entwickeltes Messprinzip ein. Die Sonde war im Grunde eine galvanische Zelle, in der eine Silberanode und eine Platinkatode in eine Kaliumjodidlösung eintauchten. Eine schwache Gegenspannung blockierte den Stromfluss, doch sobald ozonhaltige Luft durch die Lösung gepumpt wurde, lief eine elektrochemische Reaktion ab, die zwei Elektronen je Ozonmolekül freisetzte.

Ein sowjetischer Radiosender vom Typ RKS-5 an Bord der OSE funkte Stromstärke sowie Temperatur- und Luftfeuchtedaten zur sowjetischen Antarktisstation »Nowolasarewskaja«, die etwa zwei Kilometer von den DDR-Containern entfernt lag. 1992 wurde die regelmäßige Ozonmessung der bundesdeutschen Neumayer-Station II übertragen. Die Klimaforscher verwenden seitdem die ECC-Sonde: eine Weiterentwicklung, die ohne Gegenspannung auskommt und noch genauer arbeitet.

Spektrometrische Messungen, seit den 1970er Jahren auch von Satelliten aus, und Sondenflüge liefern weitere Daten, um die Prozesse rund um das Ozon in der Stratosphäre zu modellieren. Die Berechnungen haben bestätigt, dass FCKWs einen wesentlichen Anteil am alljährlichen Ozonloch haben. Ihre inzwischen weltweite Ächtung wird leider nur langsam Wirkung zeigen, denn die schon in die oberen Luftschichten gelangten Moleküle sind sehr stabil. Vermutlich werden die Ozonwerte erst 2065 wieder auf das Niveau vor 1985 steigen.

Daniela Zeibig studiert Wissenschaftsjournalismus an der Technischen Universität Dortmund.

Das Augustheft 2012 ist ab 24.7. im Handel.

RON MILLER

Super-Supernovae

Die größten Sterne beenden ihre Laufbahn mit einer ungeahnt heftigen und lange andauernden Explosion. In solchen extremen Supernovae scheinen mitunter Prozesse abzulaufen, bei denen sich Materie und Antimaterie zu purer Energie vereinen.

PLAMEN PETKOV

Schalter im Erbgut

Epigenetische Veränderungen im Gehirn spielen eine große Rolle bei psychiatrischen Erkrankungen, etwa Sucht oder Depression. Das eröffnet Wissenschaftlern neue Wege, Medikamente gegen seelische Störungen zu entwickeln.

DANIELA LEITNER

Graphen aus dem Chemielabor

Das erst vor acht Jahren entdeckte Material aus Kohlenstoffatomen, die in einem einlagigen Bienenwabenmuster angeordnet sind, könnte die Elektronik revolutionieren. Noch fehlen effiziente Herstellungsmethoden. Doch Chemiker sind dabei, sie zu entwickeln.

Wie riskant ist Fracking?

Für eine höhere Förderleistung und zur Erschließung unkonventioneller Quellen von Erdgas und -öl werden Gesteinsformationen rund um das Bohrloch durch Einpressen von Flüssigkeiten aufgesprengt. Dieses »Fracking« könnte nach Ansicht von Kritikern das Grundwasser gefährden und andere Umweltschäden hervorrufen.

Sklavenhandel ließ Westafrikas Königreiche erblühen

Der verstärkte Sklavenhandel Mitte des 17. Jahrhunderts führte zu tief greifenden gesellschaftlichen Veränderungen an der Bucht von Benin: Siedlungen wuchsen zu Städten, und kleinere Reiche entwickelten sich zu straff organisierten Staaten, die miteinander um Macht und Einfluss rangen.

NEWSLETTER

Möchten Sie regelmäßig über die Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?

Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:
www.spektrum.com/newsletter

DIE VORTEILE EINES ABONNEMENTS

So vielfältig wie unser Magazin!

1 12 Ausgaben zum Preis von nur € 84,– inkl. Versand Inland (statt € 94,80 im Einzelkauf); für Schüler, Studenten und Azubis auf Nachweis sogar nur € 69,90

2 2 in 1: Sie erhalten nicht nur die Printausgabe, sondern können auch schon drei Tage vor dem Erstverkaufstag auf die Digitalausgabe zugreifen!

3 Kostenloser Zugriff auf das Onlineheftarchiv von **Spektrum der Wissenschaft** mit fast 9000 Artikeln

4 Bonusartikel und Gratisdownloads ausgesuchter Sonderhefte im Internet

5 Verbilligter Erwerb des Produkts des Monats

Produkt im Juli

Das Spiel »Verschätzt noch mal!« präsentiert kurioses Wissen und verrückte Fragen

6 **Zusätzlich für Ihre Abobestellung erhalten Sie ein Präsent Ihrer Wahl!**

Weitere Präsente finden Sie im Internet ...

Auf der CD-ROM von **Spektrum der Wissenschaft** finden Sie den kompletten Jahrgang 2011 als elektronische Datei inklusive aller Bilder und eine Datei mit allen Jahresinhaltsverzeichnissen sämtlicher Ausgaben von 1978 bis 2011 im Portable Document Format (PDF).

Das fadengeheftete A4-Spektrum-Artbook bietet Ihnen auf 160 Seiten Platz für Ihre Notizen. Mit Verschluss- und Lesezeichenband sowie einer Stiftschlaufe.

Das Buch »Die großen Fragen – Universum« behandelt grundlegende Probleme und Konzepte in der Wissenschaft, die Forscher und Denker seit jeher umtreiben.

Dieses und zusätzliche Aboangebote wie **Geschenkabo**, **Miniabo** oder **Leser-werben-Leser-Abos** finden Sie unter:

www.spektrum.de/abo

Spektrum DER WISSENSCHAFT
WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

online: spektrum.de/abo
E-Mail: service@spektrum.com
Tel.: 06221 9126-743

Fax: 06221 9126-751
mit der Bestellkarte anbei

nature jobs CAREER EXPO HEIDELBERG 2012

24. Oktober 2012

Besuchen Sie die Karrieremesse für Wissenschaftler in Heidelberg!

Print Media Academy
Heidelberg
24. 10. 2012
10 – 17 Uhr

Die große Karrieremesse für Wissenschaftler aus den Bereichen Physik, Chemie, Medizin, Mathematik und Life Sciences von **Spektrum der Wissenschaft** und **nature** bieten Ihnen wertvolle Kontakte, ein exklusives Konferenzprogramm und zahlreiche Workshops. Treffen Sie Entscheider aus Forschung, Wissenschaft und Wirtschaft und lernen Sie deren Karrierewege kennen, wenn Sie

- **Student, Absolvent, Doktorand oder Postdoc sind**
- **sich beruflich verändern wollen**

Erfahren Sie aus erster Hand alles über aktuell freie Stellen und die besten Strategien für die Entwicklung Ihrer beruflichen Laufbahn. Der Eintritt zum Messebereich und zu den Workshops ist frei! Die Teilnahme am Konferenzprogramm kostet für Frühbucher bis zum 15. 09. 2012 € 25,–, danach € 40,–. Konferenzprogramm teilweise in englischer Sprache.

Für weitere Informationen und zur Anmeldung

www.spektrum.com/careerexpo

Wenn Sie Aussteller, Sponsor oder Referent werden möchten, kontaktieren Sie bitte:
Anke Walter · Tel.: +49 6221 9126-744 · walter@spektrum.com

nature jobs Spektrum DER WISSENSCHAFT

präsentiert von: academics DIE ZEIT

Das Schweizer
Forschungsmagazin
Nr. 93, Juni 2012

horizonte

Homo scientificus helveticus 6

Der SNF: Seit 60 Jahren für die Forschung 14

Wenn der Kuh das Milchgeben weh tut 18

Irrationales Peer-Review 30

FNSNF
Schweizerischer Nationalfonds
zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung

Blaue Seide oder Was Grundlagenforschung nützt

Seit drei Jahren schon beschäftigt sich der junge Literaturwissenschaftler mit – sagen wir mal – dem deutschen Schriftsteller Carl Joachim Friedrich Ludwig von Arnim, schlichter bekannt als Achim von Arnim. Er hat die Romane und Dramen des Vertreters der Heidelberger Romantik vor- und rückwärts gelesen, mehrere Archive aufgesucht, um verschiedene Textvarianten zu vergleichen, und nach zwei schlaflosen Nächten den dritten tiefenpsychologischen Interpretationsversuch der «Melück Maria Blainville, die Hausprophetin aus Arabien» verworfen. Schliesslich beendet er seine Dissertationsschrift doch noch: ein vierhundert Seiten starkes, in kleiner Auflage gedrucktes Buch, das von der Romantik-Forschung interessiert aufgenommen und kontrovers diskutiert wird.

Die Geschichte wirft mindestens drei Fragen auf: Wer hat die Dissertation bezahlt? Was nützt sie? Und was hat Achim von Arnim am blauseidenen Mantel gereizt, den Melücks magische Schneiderpuppe nicht mehr hergibt? Einfach zu beantworten sind nur die zwei ersten Fragen. Erstens: Bezahlt hat der Schweizerische Nationalfonds. Er finanziert hierzulande die Grundlagenforschung, die hauptsächlich um des wissenschaftlichen Erkenntnisgewinns willen betrieben wird, sei es in der Molekularbiologie, der Teilchenphysik, der Gewaltsoziologie oder der Literaturwissenschaft.

Zweitens: Auch wenn das Buch ausserhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft nicht viele Leser finden wird, die seinen verschlungenen Deutungssträngen folgen mögen: Es nützt der Gesellschaft. Ohne Kultur ist kein Zusammenleben möglich – Kultur im Sinne der menschlichen Fähigkeit, einander zu verstehen, einander zu widersprechen und einander etwas Interessantes mitzuteilen, auf dass man sich bilden und einen neuen Gedanken fassen kann. Auch die Entwicklung der innovativsten Maschine gründet in diesem Humus. Eines seiner Moleküle ist eine Monografie über einen adligen Seidenfetischisten in Preussen.

Urs Hafner
Redaktion «Horizonte»

Susi Lindig/ETHZ

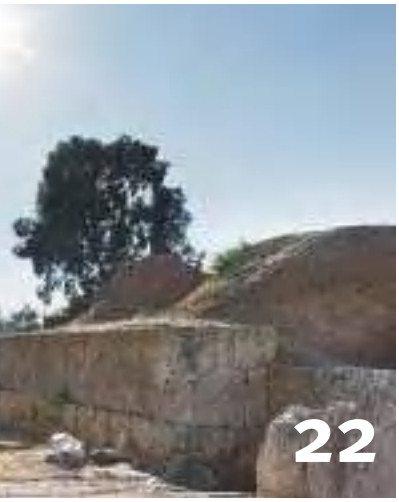
Hans-Christian Wepfer/Lab25

18

Andreas Voegelin/Antikenmuseum Basel

srf.ch

26



schwerpunkt forschungsplatz schweiz

6 Forschen in der Schweiz
Die Schweiz ist traditionell eine Hochburg der Ingenieurwissenschaften. Heute ist sie mit ihren vielen guten universitären Hochschulen ein Magnet für Forschende aller Disziplinen aus der ganzen Welt. Der einheimische Nachwuchs fehlt indes.

biologie und medizin

18 Forschung im Kuhstall
Kühe sind leistungsfähige Milchlieferantinnen – und leiden darunter.

20 Gefährliche Furchtlosigkeit
Aids gilt heute als heilbar. Gerade deshalb nimmt die Zahl der Neuinfektionen zu.

21 Trainieren gegen Autismus
Sozial meckern
Wohlfühlpille Ecstasy

gesellschaft und kultur

22 Mit der Zunge gegen böse Feinde
Eretria in Griechenland ist ein Zentrum der schweizerischen Archäologie.

24 Zeitlose Stirnlocke
Comics sind nicht simpel, sondern komplexe Kunstwerke mit Unterhaltungswert.

25 Qualität als gesundheitsmedizinische Floskel?
Moldawien will Forschende zurückholen
Dominantes Deutsch in der Bundesverwaltung

technologie und natur

26 Mut zur Prognose
Bern hat sich als Zentrum der internationalen Klimaforschung etabliert.

28 Tüfteln mit Atomen
Die Kernfusion: Ein alter Traum könnte die Energieerzeugung revolutionieren.

29 Schneller schwimmen mit Sensoren
Quantenkryptografischer Wettkampf
Heilige Bäume als Klimazeugen

4 snf direkt
Claire Jacob erhält den Marie Heim-Vögtlin-Preis 2012.

5 nachgefragt
Werden die nationalen Forschungsförderer überflüssig, Herr Imboden?

13 im bild
Die Unruh, das Herz der Uhr

14 porträt
Der Schweizerische Nationalfonds: seit sechzig Jahren für die Forschung

16 vor ort
Der Ökologe Lian Pin Koh untersucht auf Borneo, wie sich der Anbau von Ölpalmen auf die Umwelt auswirkt.

30 im gespräch
Das Peer-Review funktioniert nicht nach rein rationalen Kriterien, sagt der Soziologe Martin Reinhart.

32 cartoon
Ruedi Widmer

33 perspektiven
Didier Trono fordert die Begrenzung der Forschungsfreiheit.

34 wie funktionierts?
Der Fahrplan der SBB

35 für sie entdeckt
Teilchenphysik zum Aufklappen

Verantwortungsvolle Forschung

Annette Boutellier

Dass sich Schweizer Forschende in der Zusammenarbeit mit ökonomisch schwächeren Ländern engagieren, hat eine lange Tradition. Indem sich die Forschungsgemeinschaft weltweit für eine nachhaltige Entwicklung einsetzt, nimmt sie gesellschaftspolitische Verantwortung wahr. Die Direktion für Entwicklung und Zusammenarbeit und der SNF haben nun das Swiss Programme for Research on Global Issues for Development (r4d.ch) geschaffen. Das Programm verfolgt das Ziel, in den Entwicklungsländern Kenntnisse und Lösungen zu fördern, mit deren Hilfe globale Herausforderungen bewältigt werden können. Geforscht wird unter anderem zu folgenden Themen: gesellschaftliche Konflikte in schwachen Staaten, Armutsreduktion, landwirtschaftliche Produktionssysteme und Ernährungssicherheit, nachhaltige Nutzung von Ökosystemen sowie Versorgungssysteme im Gesundheitsbereich. Für die Laufzeit des Programms von 2012 bis 2022 stehen 97,6 Millionen Franken zur Verfügung.

Martin Vetterli für Dieter Imboden

Der Nationale Forschungsrat beurteilt jährlich mehrere Tausend dem SNF unterbreitete Projektgesuche und entscheidet über deren Unterstützung. Anfang März hat der Ausschuss des Stiftungsrats des SNF Martin Vetterli für die Amtsperiode 2013 bis 2016 zum Präsidenten des Nationalen Forschungsrats gewählt. Der Ingenieurwissenschaftler ist Professor für Kommunikationssysteme und Dekan der School of Computer and Communication Sciences an der ETH Lausanne (EPFL). Er tritt die Nachfolge von Dieter Imboden an, der diese Position Ende 2012 nach acht Jahren abgeben wird. Als langjähriger Vizepräsident der EPFL und ehemaliges Mitglied des Schweizerischen Wissenschafts- und Technologierats kennt Martin Vetterli die Schweizer Hochschul- und Forschungspolitik bestens. Für seine eigene Forschung in den Bereichen Elektrotechnik, Computerwissenschaften und angewandte Mathematik wurde er mehrmals national und international ausgezeichnet, unter anderem 1996 mit dem Nationalen Latsis-Preis.

Gabriele Gendotti für Hans Ulrich Stöckling

Der Stiftungsrat des SNF hat den Tessiner Rechtsanwalt Gabriele Gendotti Ende Januar für die Amtsperiode 2012 bis 2015 zu seinem Präsidenten gewählt. Der ehemalige National- und Regierungsrat löst Hans Ulrich Stöckling an der Spitze des SNF ab. Gabriele Gendotti gehört dem Stiftungsrat bereits seit 2003 als Bundesvertreter an. Als langjähriger Erziehungsdirektor ist er mit bildungs- und forschungspolitischen Fragen vertraut. Von 2000 bis 2011 war er Mitglied der Schweizerischen Universitätskonferenz und der Schweizerischen Konferenz der kantonalen Erziehungsdirektoren.

Neue MHV-Preisträgerin

Der Marie Heim-Vögtlin-Preis 2012 geht an die Neurobiologin Claire Jacob. Mit dieser Auszeichnung würdigt der SNF die wissenschaftlichen Arbeiten und Karrieren von Forscherinnen. Claire Jacob widmete sich zuerst insbesondere den Mechanismen chronischer Entzündungen. Später erweiterte sie ihr Forschungsgebiet auf die Neurobiologie. Mit ihren durch MHV-Beiträge unterstützten Arbeiten, die sie nach der Geburt ihres ersten Kindes an der ETH Zürich realisierte, gewann sie neue Erkenntnisse zur Rolle von Chromatinregulatoren (HDAC) für die Myelinisierung der Nervenzellen und das Überleben der Schwann-Zellen. Diese Ergebnisse könnten zu einer besseren Steuerung der Regeneration peripherer Nerven nach einer Verletzung beitragen. Die Neurobiologin führt ihre Forschung als Assistenzprofessorin an der Universität Freiburg fort. Der SNF vergibt seit 1991 MHV-Beiträge an Forscherinnen, deren wissenschaftliche Laufbahn aus familiären Gründen unterbrochen wurde.

Agora: Wissenschaft sucht Dialog

Der SNF finanziert mit dem Programm Agora 17 Kommunikationsprojekte mit insgesamt 2,1 Millionen Franken. Forschende können also ihre Arbeiten präsentieren. Der SNF hat weder bei der Themenwahl, der Form der Kommunikation noch bei den Zielgruppen – Familien, Kinder, Schülerinnen und Schüler, Jugendliche, Fachleute – Vorgaben gemacht. Die bewilligten Projekte regen daher den Dialog über sehr unterschiedliche wissenschaftliche Themen an, wie z.B. die Metaphysik von gewöhnlichen Objekten, die Geschichte der Gleichstellung der Geschlechter oder die sexuelle Fortpflanzung in der Natur.

horizonte
SCHWEIZER FORSCHUNGSMAGAZIN

Erscheint viermal jährlich
auf Deutsch und Französisch.
24. Jahrgang, Nr. 93, Juni 2012

Herausgeber
Schweizerischer Nationalfonds
zur Förderung der wissenschaftlichen
Forschung (SNF)
Abteilung Kommunikation
Leitung Philippe Trinchan

Das «Horizonte»-Abonnement
ist kostenlos. Die Papierversion
wird nur in der Schweiz verschickt.
Die präsentierten Forschungsprojekte
werden in aller Regel vom SNF
unterstützt.

ISSN 1663-2710

Redaktion
Urs Hafner (uha), Leitung
Philippe Morel (pm)
Ori Schipper (ori)
Marie-Jeanne Krill (mjk)

Gestaltung
und Bildredaktion
Lab25, Laboratory of Design
Zürich
Isabelle Gargiulo
Hans-Christian Wepfer
Anita Pfenninger, Korrektorat

Übersetzung
Weber Übersetzungen

Druck und Litho
Stämpfli AG, Bern und Zürich

© alle Rechte vorbehalten.
Nachdruck der Texte
mit Genehmigung
des Herausgebers erwünscht.

Adresse
Schweizerischer Nationalfonds
Abteilung Kommunikation
Wildhainweg 3, Postfach 8232
CH-3001 Bern
Tel. 031 308 21 48
Fax 031 308 22 65
abo@snf.ch

www.snf.ch/horizonte
> facebook.com/
ForschungsmagazinHorizonte

Auflage
24 900 deutsch, 12 800 französisch

Umschlagbild oben: Die geplanten Studentenwohnungen der ETH Zürich (Hönggerberg). Bild: architektick.ch

Umschlagbild unten: Die Sonne, aufgenommen von einer Raumsonde der Esa und Nasa (Januar 2012).
Bild: SoHo/NASA

Der SNF

Das Forschungsmagazin «Horizonte» wird vom Schweizerischen Nationalfonds (SNF) herausgegeben, der wichtigsten Schweizer Institution zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung. Der SNF fördert im Auftrag des Bundes die Grundlagenforschung in allen wissenschaftlichen Disziplinen. Im Zentrum seiner Tätigkeit steht die wissenschaftliche Begutachtung der von den Forschenden eingereichten Projekte. Der SNF unterstützt jährlich mit 700 Millionen Franken fast 3500 Projekte, an denen rund 8000 Forschende beteiligt sind.

Annette Boutellier

«Ideen zählen, nicht die Nationalität»

Der europäische Forschungsraum soll nicht nur von oben, sondern auch von unten, von den einzelnen Nationen her, zusammenwachsen, sagt Dieter Imboden.

Herr Imboden, Europas Forschungsraum soll im globalen Wettbewerb gegenüber den USA und China bestehen. Wieso gibt es überhaupt Forschungsblöcke, die gegeneinander antreten?
Dieses Bild kommt aus der Politik, die der Wählerschaft die Investitionen in die Forschung schmackhaft machen muss. Das geht besser, wenn sie vom Erhalt von Arbeitsplätzen sprechen kann, die von internationaler Konkurrenz bedroht sind. Doch das Bild entspricht nicht der Realität der Forschenden. Wenn sich Wissenschaftler zu einem Team zusammenschliessen, zählen Ideen und Fachwissen, nicht ihre Nationalität.

Trotzdem: Hat Europa gegen China mit seinen immensen Mitteln eine Chance?
Auch in der Forschung kommt Qualität vor Quantität. Die besten chinesischen Wissenschaftler haben zumindest einen Teil ihrer Ausbildung im Ausland genossen. China investiert zwar enorme Summen, doch das Schulsystem fördert Fleiss und Auswendiglernen. Das kritische Denken, das Hinterfragen von momentan gültigem Wissen kommt zu kurz. Dieser Herausforderung muss sich China noch stellen.

Nun will Europa mit den sogenannten Flaggschiff-Projekten klotzen.
Ob der Kaiser wirklich Kleider trägt und dies der richtige Weg ist, den Stern der europäischen Forschung heller erstrahlen zu lassen, wird sich zeigen.

Wie kann die Forschung die nationalen Grenzen in Europa überwinden?
Einige Hürden, zum Beispiel solche arbeitsrechtlicher Natur, muss die Politik beseitigen. Andere Hindernisse können wir mit unsern Schwesterorganisationen selber aus dem Weg räumen. Beispielsweise sprechen wir schon seit vier Jahren Fördergelder für Projekte mit Schweizer Beteiligung, die eine andere Forschungsförderungsorganisation geprüft und für gut befunden hat. Die Ausweitung des sogenannten Lead-Agency-Verfahrens gehört zu den Zielen von Science Europe: Der europäische Forschungsraum soll nicht nur von oben, von der EU, sondern auch von unten, von den einzelnen Nationen her, zusammenwachsen.

Die EU schiesst immer mehr Geld in die Forschung ein und der europäische Forschungsraum wächst immer enger zusammen. Werden die nationalen Forschungsförderer überflüssig?
Nein, die europäische und die nationale Forschungsförderung ergänzen sich. Der Schweizerische Nationalfonds kennt beispielsweise keine Advanced Grants für erfahrene Forschende wie der europäische Forschungsrat. Dafür kann der SNF beispielsweise gezielt die klinische Forschung in der Schweiz fördern, wenn er will.

Verglichen mit dem Europäischen Forschungsrat, dem ERC, bewilligt der SNF eine höhere Quote der eingereichten Projekte. Gibt er sich mit dem Mittelmass zufrieden?
Nein, eine tiefe Bewilligungsquote ist kein Beweis für gute Qualität. Beim ERC geben im Verhältnis zu den verfügbaren Mitteln viel mehr Forschende ein Gesuch ein. Dadurch sinkt die Effizienz des Systems, denn die vielen Forschenden, die kein Geld bekommen, haben beim Verfassen ihres Gesuchs trotzdem einen beträchtlichen administrativen Aufwand betrieben. Deswegen kämpft der SNF für vernünftige Erfolgsquoten. Dass die Qualität nicht darunter leidet, zeigen Beispiele von Forschenden, die bei uns scheitern und später beim ERC mit ihrem Projekt durchkommen. Natürlich kommt auch das Umgekehrte vor. **Interview ori** ■

> «Ob der Kaiser wirklich Kleider trägt, wird sich zeigen.»

Dieter Imboden ist Professor für Umweltphysik an der ETH Zürich und steht seit 2005 dem Nationalen Forschungsrat des SNF vor. Er war Ende 2011 massgeblich an der Entstehung von Science Europe beteiligt, dem Zusammenschluss europäischer nationaler Forschungsförderungsorganisationen.

Forschen in der Schweiz

Hey Studio

Forschungsplatz Schweiz: Das ist ein dichtes Netz von zwölf universitären Hochschulen, vier Instituten, die zum ETH-Bereich gehören, und sieben Fachhochschulen, das sind der Schweizerische Nationalfonds und die Kommission für Technologie und Innovation, das sind viele Labors privater Unternehmen aus der Schweiz und der ganzen Welt, das ist das internationale Cern in Genf. Forschungsplatz Schweiz, das sind viele eindrückliche Zahlen: rund 16 Milliarden Franken jährlich für Forschung und Entwicklung, der erste Platz des Innovation Union Scoreboard, der erste Platz punkto eingereichter Patente, eine sehr hohe Anzahl Publikationen pro Einwohner.

Forschungsplatz Schweiz: Das sind die aufstrebende Romandie und das Physikalisch-Meteorologische Observatorium Davos, das sind aber auch Mythen und Mängel. Nicht nur die Schweiz, auch die meisten westlichen Länder und sowieso das aufstrebende China sehen sich mittlerweile als Forschungsnationen. Verdankt die Schweiz ihren Reichtum dem Rohstoff Bildung? Was tut sie, um das Fehlen des akademischen Nachwuchses aufzufangen? **uha** ■

Ländliche Folklore vor industrieller Infrastruktur: Als Säumer verkleidete Wanderer am Speichersee im Grimselgebiet (2003). Bild: Urs Flüeler/Keystone

Bauernland in Ingenieurshand

Der Forschungsplatz Schweiz zeichnet sich durch hohe privatwirtschaftliche Investitionen und eine tiefe Hochschulabsolventen-Quote aus. Ohne Akademiker-Immigration hätte das Land ein grosses Problem. *Von Urs Hafner*

Ein Land ohne Rohstoffe und Bodenschätze ist auf Bildung und Wissen angewiesen, um seinen Wohlstand mehren zu können. Der Satz hat sich unter den westlichen Nationen als Topos etabliert. Auch die Schweiz führt ihn gern ins Feld. Kultivierte sie im 19. und noch in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts das Bild des selbstgenügsamen Bauernlands, sieht sie sich heute als Forschungsnation.

Vielleicht aber verhält es sich gerade umgekehrt – vielleicht ist die Schweiz nicht wohlhabend, weil sie mehr Gelder als Deutschland, Frankreich und England in die Forschung investiert, sondern weil sie sich als wohlhabendes Land den Ausbau dieses Sektors leisten konnte? Dieser Ansicht ist der Historiker Jakob Tanner von der Universität Zürich. «Die moderne Schweiz ist nicht aus Kargheit geboren. Sie hatte die Ressourcen für ihre frühkapitalistische Viehexportwirtschaft und die protoindustrielle Textilproduktion.»

Noch zu Beginn des 19. Jahrhunderts besass die republikanische Schweiz kaum Akademien und mit Basel nur eine Universität, die zudem als eine Art Familienbetrieb geführt wurde. Die umliegenden Monarchien waren punkto Wissenschaften besser aufgestellt. Doch seit dem liberalen Aufbruch der 1830er Jahre entstand ein dichtes Netz von föderal gestützten Universitäten – und natürlich die Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Sie ist heute die renommierteste Schweizer Hochschule.

Im Kindergarten anfangen

Dass sich der junge Bundesstaat ein Technikum leistete, ist bezeichnend. Erst war von der liberalen Elite eine Nationaluniversität geplant, doch diese hatte gegenüber der anwendungsorientierten ETH das Nachsehen. «Die aufstrebende Industrienation mit ihren Bergen, Tälern und Seen rief geradezu nach kühnen ingenieuralen Konstruktionen, nach neuen Brücken, Eisenbahntunnels und Staumauern», sagt Jakob Tanner. Die schweizerische Forschung und die Wissenschaft sind stark durch den Industriegeist geprägt.

Das lässt sich an der Forschungsförderung ablesen. «Der hohe Anteil unternehmensfinanzierter Forschung ist ein Spezifikum des Forschungsplatzes Schweiz. Man kann dies als Dominanz privatkapitalistischer Verwertungsinteressen oder aber als hohe Marktflexibilität der Schweizer Forschung bezeichnen – je nach Standpunkt», sagt Tanner. Fast siebzig Prozent der Aufwendungen für die Forschung stammen aus der Privatwirtschaft, knapp fünfundzwanzig Prozent vom SNF, der fast ausschliesslich Grundlagenforschung fördert. In Europa liegt der staatliche Anteil an der Forschungsfinanzierung im Schnitt um zehn Prozent höher.

Trotz dem dichten Netz ihrer zwölf universitären Hochschulen leidet die Schweiz unter dem im internationalen Vergleich tiefen Anteil an Hochschulabsolventen. Diesen macht sie zurzeit wett mit dem günstigen Import hochqualifizierter Arbeitskräfte vor allem aus Deutschland. Auf die Dauer ist das jedoch keine Lösung. Der neuste Bericht des Schweizerischen Wissenschafts- und Technologierates empfiehlt denn auch, den wissenschaftlichen Nachwuchs besser zu fördern. Die Förderung müsse bereits im Kindergarten und in der Volksschule anfangen. Schon hier würden Kinder aus unterprivilegierten und bildungsfernen Milieus benachteiligt. ■

Auf der Poleposition

Die universitären Hochschulen der Westschweiz haben in den letzten zehn Jahren ihre Zusammenarbeit intensiviert. Eine Erfolgsgeschichte? *Von Xavier Pellegrini*

Die Entscheidungsträger sind sich fast einig, zumindest auf der westlichen Seite der Saane: Die Zusammenarbeit zwischen der Universität Lausanne, der Universität Genf und der ETH Lausanne – mit ihrem charismatischen Präsidenten Patrick Aebischer, der die Unterstützung multinationaler Unternehmen wie Nestlé, Logitech oder Rolex gewinnen konnte – ist eine Erfolgsgeschichte. Wie hat sie begonnen?

Forschung als Wachstumsmotor

In den 1990er Jahren war die Rede vom «Projet triangulaire lémanique»: Nach einer langen Wirtschaftskrise und entsprechend knappen staatlichen Ressourcen wollten die Kantone Genf und Waadt sowie der Bund ihre universitären Hochschulen zum Sparen bringen, indem diese gewisse Fakultäten oder Disziplinen auf einen Standort konzentrierten. Das Ergebnis war wenig berauschend: Die akademischen Kreise sträubten sich mit Haut und Haar.

In den 2000er Jahren änderte sich dies radikal: Nun war Zusammenarbeit Trumpf; die Hochschulbehörden und Professoren überboten sich gegenseitig, als es darum ging, mit Vertretern anderer Hochschulen Kontakte zu knüpfen.

Weshalb dieser Gesinnungswandel? Eine neue Studie («Gouverner les universités. L'exemple de la coordination Genève–Lausanne», Lausanne 2012) spricht von einem «günstigen Zeitfenster zwischen 1998 und 2002»: Einerseits hatten sich die öffentlichen Finanzen wieder etwas erholt, andererseits vollzog sich auf europäischer Ebene ein Paradigmenwechsel – das Konzept der Wissensgesellschaft setzte sich durch. Plötzlich waren sich alle Akteure einig, auch die für Bildung und Forschung zuständigen Bundesbehörden, dass Lehre und Forschung gefördert werden müssten, weil sie Wachstumsmotoren seien. Seither gilt es nicht mehr zu sparen, sondern im Gegenteil zu investieren, zumindest in gewissen strategischen Disziplinen, was in vielen Fällen die Zusammenarbeit zwischen den Universitäten bedingt. Anklang hat der neue Ansatz besonders in der Genferseeregion gefunden.

Weshalb sind die Region Zürich mit ihrer Technischen Hochschule und ihrer Universität sowie die Universitäten Basel und St. Gallen dem Beispiel nicht gefolgt? Laut Jean-Philippe Leresche, Politologe an der Universität Lausanne und Mitautor von «Gouverner les universités», liegt einer der Gründe darin, dass die Deutschschweiz stark vom Humboldtschen Ideal der Unabhängigkeit von Bildungsinstitutionen geprägt sei, während die Universitäten der Romandie in der Tradition napoleonischen Gedankenguts empfänglicher für politische Einflüsse seien. Die akademische Welt der deutschsprachigen Schweiz zeige sich auch skeptischer gegenüber einer Zusammenarbeit mit der Wirtschaft. Schliesslich: «Zürich sieht sich als Wissenschaftszentrum der Schweiz. Deshalb ist die Region weniger motiviert, etwas zu ändern.»

Ist also das «Projet triangulaire lémanique» eine Erfolgsgeschichte? Vorderhand ist das schwierig abzuschätzen. Jean-Philippe Leresche: «Die Euphorie der Westschweizer Medien scheint mir manchmal etwas übertrieben, doch die Signale sind positiv. Es sind keine kritischen Stimmen mehr zur Zusammenarbeit zu vernehmen, und diese wird weiter ausgebaut und langfristig ausgerichtet.» ■

Westschweizer Morgenröte? Das Rolex-Learning-Center der ETH Lausanne, entworfen vom japanischen Architekturbüro Sanaa (2010). Bild: Alain Herzog/EPFL

Im Bann der Sonne

Das Physikalisch-Meteorologische Observatorium Davos ist weltweit führend in der Messung der Sonnenstrahlung. Es untersucht ihren Zusammenhang mit dem Klima. *Von Philippe Morel*

Das Licht ist gleissend hell. Es ist noch nicht Mittag, und doch brennt die Frühlingssonne bereits vom Himmel. «Wenn Sie den Zeigefinger vor die Sonne halten, sehen Sie keinen Halo-Effekt. Dies weist auf eine klare Atmosphäre hin, die für die Messung der Sonnenstrahlung ideal ist. Im Moment liegt die Intensität wohl bei einem Kilowatt pro Quadratmeter», erklärt der Astronom Werner Schmutz. Er leitet das Physikalisch-Meteorologische Observatorium Davos seit 1999.

Auf dem Dach provisorischer Baracken, in denen das Observatorium während der Renovation untergebracht ist, steht ein ganzes Arsenal von Instrumenten. Sieben Radiometer sind auf die Sonne gerichtet. «1971 hat die Weltorganisation für Meteorologie das Observatorium Davos zum World Radiation Center bestimmt. Die sieben Radiometer, die wir als Standardgruppe bezeichnen, sind die Referenz im Bereich der Sonnenstrahlung schlechthin. Sie dienen als eine Art Eichmass und werden zur weltweiten Kalibrierung von Instrumenten verwendet», sagt der Astronom. Der Unterhalt und die Bewirtschaftung dieser Standardgruppe mit ihrer alternden Elektronik stehen im Mittelpunkt der Tätigkeit des Observatoriums, das gleichzeitig an der Entwicklung der zweiten Generation Geräte arbeitet.

Tuberkulose und Wissensdurst

Das Abenteuer Sonne begann in Davos Anfang des 20. Jahrhunderts. Damals wütete vielerorts die Tuberkulose. Carl Dorno, ein deutscher Geschäftsmann, brachte seine kranke Tochter in das Bündner Dorf, einen renommierten Kurort. Als begeisterter Anhänger der Naturwissenschaften fragte er sich, was die Gründe für das heilsame Klima sein könnten. Er interessierte sich insbesondere für die Sonnenstrahlung. Mit eigenen Mitteln gründete er 1907 das Physikalisch-Meteorologische Observatorium. 1908 führte er erste Messungen durch, die er 1909 publizierte. Seine Arbeit befasste sich im Wesentlichen mit der ultravioletten Strahlung, die während einiger Zeit sogar Dorno-Strahlung genannt wurde.

1926 wurde das Observatorium Teil des Schweizerischen Forschungsinstituts für Hochgebirgsklima und Medizin, dessen Finanzierung die Gemeinde Davos originellerweise mit einem Teil der Kurtaxe sicherstellte. «Die Wissenschaft spielt in Davos seit jeher eine wichtige Rolle. Die Kleinstadt mit 13 000 Einwohnern beherbergt fünf Forschungsinstitute, die rund 300 Mitarbeitende beschäftigen. Trotz gesundem Klima, Postkartenlandschaft und Skifahren ist es jedoch nicht immer einfach, Mitarbeitende zu finden», meint Werner Schmutz. Wäre es in unserer Zeit der Informatiknetzwerke nicht zweckmässiger, sich einem grossen Universitätszentrum anzuschliessen und Fernmessungen vorzunehmen? «Nach allem, was ich bisher inner- und ausserhalb der Schweiz beobachten konnte, ist das keine ideale Lösung. Das Interesse für die Instrumente erlischt schnell, und die Qualität der Messungen leidet darunter», ist Schmutz überzeugt. Die Sonnenstrahlung

Weltraumforschung im Kurort: Links das Herzstück des Davoser Observatoriums, ein Gerät zur Messung der Sonnenstrahlenintensität, geprüft von Werner Schmutz (März 2004). Unten: Mitarbeiter des Observatoriums in den dreissiger Jahren (rechts Wilhelm Gustloff, NSDAP-Mitglied, der 1936 in Davos erschossen wurde).
Bilder: Arno Balzarini/Keystone (links), Dokumentationsbibliothek Davos

ist bei Weitem die wichtigste Energiequelle der Erde und ein Schlüsselfaktor des Klimas. Bei einer gegebenen Oberfläche verändert sich dieser Energiefluss jedoch; zu regelmässigen Schwankungen kommt es durch die Exzentrizität der Erdumlaufbahn sowie durch die Neigung der Erdrotationsachse und deren Präzession (Kreiselbewegung). Diese Phänomene waren für die Eiszeiten während der letzten Million Jahre verantwortlich. Ausserdem kommen mehr oder weniger grosse Schwankungen auch von der Sonne selbst; das bekannteste Beispiel dafür sind die in einem elfjährigen Zyklus wiederkehrenden Sonnenflecken.

Die Veränderungen werden aber auch von den Gliedern am anderen Ende der Kette verursacht: von der Erde und ihrer Atmosphäre. Die Temperatur auf der Erdoberfläche hängt von der Strahlenbilanz ab. Diese ergibt sich aus der Menge der absorbierten und der ins All zurückgeworfenen Energie. Ist die Bilanz Null, bleibt die mittlere Temperatur der Erdkugel stabil. Wenn jedoch die Sonne etwas intensiver brennt, ein Vulkan einige Kubikkilometer Aerosole in die Atmosphäre spuckt oder die Menschheit riesige Mengen fossiles CO_2 freisetzt, verändert sich diese Bilanz – und somit die Erdtemperatur. «Am Boden messen wir nur die Strahlung, welche die Erdoberfläche erreicht. Wenn wir uns über die Atmosphäre und ihre Filterfunktion gegenüber der Sonnenstrahlung ins Bild setzen wollen, müssen wir höher hinaus», erklärt Werner Schmutz. Seit Ende der 1970er Jahre sind die Instrumente des Observatoriums an Bord von Ballonen, Raketen und Satelliten ins Weltall vorgedrungen. «Diese Umgebung stellt enorme Ansprüche ans Material: Es muss äusserst robust und zuverlässig, aber auch leicht und platzsparend sein. Der Wissenstransfer zwischen Instrumenten für den Einsatz auf der Erde und solchen für das All ist bereichernd», sagt Schmutz.

Apokalyptische Explosion

Zur grossen Freude des Astronomen und seines dreissigköpfigen Teams gehört das Observatorium zu den wenigen Laboratorien, die ein Weltraumexperiment von A bis Z selbst planen und durchführen können. Das letzte Experiment fand 2010 an Bord des europäischen Satelliten Picard statt, der die Variabilität der Sonne und ihrer Wirkung auf das Erdklima untersucht. «So offensichtlich ein Zusammenhang zwischen Sonnenstrahlung und Klima auch ist, so schwierig bleibt er zu quantifizieren», gibt Werner Schmutz zu bedenken. Ende des 17. und Anfang des 19. Jahrhunderts traten beispielsweise zwei Phasen mit geringer Sonnenaktivität auf, die als Maunder- und Daltonminimum bezeichnet werden. Sie gingen jeweils mit einer Abkühlung des Weltklimas einher. Die Rolle des Gestirns ist jedoch schwierig zu bestimmen, da keine direkten Messungen seiner Strahlung vorliegen. Die Wissenschaft verfügt für diese Zeiträume nur über indirekte Messungen, beispielsweise die Anzahl Sonnenflecken. Überlagert wird das Bild ausserdem durch die apokalyptische Explosion des Vulkans Tambora im Jahr 1815. Auf der Grundlage aktueller Veränderungen und anderer Indikatoren versuchen die Wissenschaftler in Davos, die Geschichte der Sonne zu rekonstruieren und die Klimamodelle darauf abzustimmen.

«Die Sonne ist im Moment eher wenig aktiv. Die grosse Frage ist, ob sie ihre Aktivität verstärken und die Klimaerwärmung beschleunigen oder ob ihre Aktivität zurückgehen wird und sie uns mit einigen Zehntelgraden Abkühlung eine Gnadenfrist einräumt», sagt Werner Schmutz. ■

Am Spass arbeiten:
Disney-Research in Zürich (2010).
Bild: Philippe Hollenstein/ETH Zürich

Kluge Köpfe und politische Stabilität

Lang waren es Chemie und Pharma, die in der Schweiz privat finanzierte Forschung betrieben. Warum lässt sich nun die Hightech-Branche hier nieder? *Von Beate Kittl*

Einmal Prinzessin sein … Kleine Mädchen erfüllen sich diesen Traum im Disney-World in Florida mit 3-D-Modellen, die ein in der Schweiz mitentwickelter Gesichtsscanner erstellt. Hinter der Kinderattraktion steckt eine komplexe Entwicklung der visuellen Informatik. Nur wenige verstehen so viel von dieser Materie wie das Team um Markus Gross von der ETH Zürich, das im Bereich Computergrafik und -animation forscht. Das war für den US-Unterhaltungskonzern vor vier Jahren Grund, eines seiner – weltweit drei – Forschungszentren an der ETH zu eröffnen.

Die Schweizer Forschungselite lockt auch andere globale Hightechfirmen an. Den Anfang machte IBM schon in den 1950er Jahren, als es ein Rechenzentrum in Rüschlikon eröffnete. Dort erfanden die IBM-Forscher Gerd Binnig und Heinrich Rohrer in den 1980er Jahren das Rastertunnelmikroskop. Damit öffneten sie den Zugang zu einer neuen, im Kleinsten verborgenen Welt, die unterdessen so intensiv erforscht wird, dass IBM und ETH letztes Jahr gemeinsam das «Binnig and Rohrer Nanotechnology Center» gründeten – in der Schweiz das erste von Industrie und Hochschule gemeinsam betriebene Forschungszentrum. Die ETH-Forscher dürften weiterhin frei ihre Themen wählen und Resultate veröffentlichen, nur die Informationen und Technologien, die IBM gehörten, müssten vertraulich behandelt werden, sagt Nanotechnikprofessor Andreas Stemmer, dessen Gruppe als eine der Ersten ins neue Nanotechnologiezentrum gezogen ist.

Die Art der Zusammenarbeit mit öffentlichen Forschungseinrichtungen ist von Unternehmen zu Unternehmen verschieden. Während beispielsweise Google in Zürich – seinem grössten Forschungs- und Entwicklungsstandort ausserhalb der USA – mit mehreren hundert Mitarbeitenden eigene Netz- und Geo-Produkte weiterentwickelt und nur für gezielte Projekte auf den starken Talentpool an den Hochschulen zurückgreift, betten sich die 40 Disney-Research-Angestellten in die akademische Gemeinschaft der ETH Zürich ein. Die Firma finanziert Doktorarbeiten mit und ermutigt die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, ihre Resultate in akademischen Fachzeitschriften zu veröffentlichen. «Wir glauben, dass wir von den Ideen und dem Konkurrenzdruck in der freien akademischen Forschung profitieren können», sagt Stephan Veen von Disney Research in Zürich.

Hohe bürokratische Hürden

Die hohe politische Stabilität der Schweiz, ihre Lage mitten in Europa, die gute Infrastruktur mit dem Flughafen und nicht zuletzt auch die hohe Lebensqualität in der Stadt Zürich sorgen dafür, dass die internationalen Topkräfte gerne hierher ziehen. Auch wenn die Firmen oft hohe bürokratische Hürden überwinden müssen, um ausländische Arbeitskräfte anzustellen, wie Stephan Veen als Einziger einräumt, obwohl dieser Negativpunkt auch die anderen stören dürfte: Bei Google Schweiz arbeiten 750 Menschen aus 75 Ländern, bei IBM in Rüschlikon einige hundert Mitarbeiter aus 45 Nationen. «Kluge Schweizer Köpfe allein genügen für diese Stellen nicht», sagt Veen. «Wir buhlen um Topleute in der ganzen Welt.» ■

Perfektionierte Schwingungen

Das Herz einer Uhr ist ihre Unruh. Sie heisst so, weil sie dauernd in Bewegung ist: Sie dreht sich um ihre Achse zuerst in die eine, dann in die andere Richtung und gibt der Uhr damit den Takt an. Dass die Unruh aus speziellem Material gefertigt sein sollte, das sich bei unterschiedlichen Temperaturen weder zusammenzieht noch ausdehnt, hatte schon Charles Edouard Guillaume erkannt. Die von ihm entdeckte Eisen-Nickel-Legierung Invar – der Name steht für invariant gegenüber Temperaturschwankungen – brachte dem Sohn eines Uhrmachers 1920 (ein Jahr vor Einstein) den Nobelpreis für Physik ein.

Die im Bild zu sehende bläulich-violett und goldgelb schimmernde Unruh ist hingegen aus Silinvar gefertigt, aus invariantem Silizium. Dieses ist wesentlich leichter als Invar und lässt sich in einem Ätzverfahren, das ursprünglich für Halbleiter in Computerchips entwickelt wurde, auf den Bruchteil eines Millimeters genau herstellen, wie Tüftler am Centre Suisse d'Electronique et Microtechnique im Auftrag der hiesigen Uhrenindustrie herausgefunden haben. Dank der neuen Unruh laufen mechanische Uhren genauer und zuverlässiger als je zuvor. **ori**

Bild: Patek Philippe

Eine umworbene Selbsthilfeorganisation

Forschung und Politik: Das ist ein mitunter schwieriges Verhältnis, wie die Geschichte des Schweizerischen Nationalfonds zeigt. Und ein fruchtbares. *Von Roland Fischer, Bild Annette Boutellier*

Man kann die Geschichte mit Zahlen beginnen: Der Schweizerische Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (SNF) hat derzeit jährlich rund 700 Millionen Franken für die Forschungsförderung zur Verfügung. Vor sechzig Jahren, als er gegründet wurde, waren es zwei Millionen. 2500 Prozent mehr Mittel – und eine dementsprechend grössere Rechenschaftspflicht? So einfach geht die Rechnung nicht. Aber in den Zahlen steckt ein Teil des Dilemmas, das sich wie ein roter Faden durch die Geschichte des SNF zieht: Ist die Stiftung einzig der Forschung, also den Geldnehmern, verpflichtet oder auch beziehungsweise vor allem der Politik, also den Geldgebern?

Die Frage führt zurück vor das Jahr 1952, als die privatrechtliche Stiftung, welche die nach Erkenntnisgewinn strebende Grundlagenforschung finanziert, gegründet wurde. In der «Prähistorie» der Forschungsförderung engagierte sich der Bund kaum. Er gönnte sich zwar nach 1848 das Polytechnikum in Zürich – heute ETHZ –, doch für die Grundlagenforschung waren ausschliesslich die Kantone zuständig. Darum stellte sich auf Bundesebene die Frage nach dem Nutzen von Forschung ohne direkte Anwendung nicht. In den 1930er Jahren begannen sich Forscherkreise für mehr Bundesmittel einzusetzen. Der Bescheid aus Bern: Dafür gibts kein Geld, man müsse einen anderen Topf suchen.

Dieser Topf wurde prompt gefunden. Während des Zweiten Weltkriegs initiierte Bern eine Arbeitsbeschaffungspolitik. Die Forschergemeinde erhoffte sich einen Anteil an der für die damalige Zeit riesigen Summe von fünf Milliarden Franken. Das Problem: Man handelte sich eine Zweckklausel ein und damit eine Diskussion über den Nutzen der Grundlagenforschung. Die Befürworter des Projekts versuchten zwar aufzuzeigen, wie die Forschung als Arbeitsbeschaffungsmassnahme taugen könne, doch so richtig glücklich mit der Allianz wurde niemand. Zudem sträubten sich die Hochschulkantone gegen eine zentrale Forschungsorganisation. So wurde die Idee 1942 sang- und klanglos begraben.

So forsch wie erfolgreich

Als die Forschergemeinde Ende der 1940er Jahre unter der Führung des Physikers und Mediziners Alexander von Muralt zu einem neuerlichen Versuch ansetzte, entging man der finanzpolitischen Bauchlandung auf erstaunlich offensive Weise: Diskussionen um die Angemessenheit der Mittel sollten von Anfang an vermieden werden, auf welchen Nutzen auch immer bezogen. Stattdessen wurde ebenso forsch wie erfolgreich die Freiheit der Forschung behauptet. Erst wenn man Wissenschaft an keinen Zweck binde, könne sie erfolgreich sein, befand man in den Anfangsjahren des SNF – auch in der Politik.

So konnte Bundesrat Philipp Etter 1952 bei der Gründung des SNF, sozusagen einer Selbsthilfeorganisation der Forschergemeinde, feierlich verkünden: «Wenn auch der Staat die Mittel vorschiesst – die Wissenschaft soll frei bleiben und nicht eine Dienerin des Staates werden! Die Freiheit ist ihr Lebenselement.» Ein Taufspruch, der nicht allzu lang Gültigkeit haben sollte. In der Folge stiegen die Beiträge für den SNF kontinuierlich an, die Anzahl der Projekteingaben auch. Noch flog man unterhalb des Radars der politischen Aufmerksamkeit. Es waren gewissermassen die unbeschwerten Kindheitsjahre des SNF, bevor der Ernst des Lebens beginnt und man sich mit den von allen Seiten gestellten Ansprüchen herumschlagen muss.

> «Die Wissenschaft soll frei bleiben und nicht eine Dienerin des Staates werden!»
> Bundesrat Philipp Etter, 1952

In den siebziger Jahren spürte der Nationalfonds das erste Mal Gegenwind. Die Beiträge hatten inzwischen rund hundert Millionen Franken erreicht, doch es war nicht eine überschrittene Budgetgrenze, die den SNF in den Fokus der Politik rücken liess; es war vielmehr eine logische Folge des Erfolgs. Die Grundlagenforschung war zu nützlich geworden, ihre strategische wie wirtschaftliche Bedeutung zu offensichtlich, als dass sich die Politik weiterhin um sie hätte foutieren können. Nun wollten die Parlamentarier ihr Wörtchen mitreden. Es war eine für den Nationalfonds schwierige, doch für die Schweizer Forschungslandschaft entscheidende und fruchtbare Zeit: Nun entfaltete sich überhaupt erst eine Wissenschaftspolitik.

Diese turbulenten und von der Wirtschaftskrise geprägten Jahre führten für den SNF zu einschneidenden Änderungen: Erstens musste er sich vom «Reinheitsgebot» der autonom verwalteten Grundlagenforschung verabschieden. 1975 wurden die Nationalen Forschungsprogramme (NFP) eingeführt, deren Inhalte von der Politik bestimmt werden und die Lösungen für gesellschaftlich akute Problemfelder

Von Forschenden, für Forschende:
Der Forschungsrat der Abteilung Geistes- und Sozialwissenschaften des SNF entscheidet über Gesuche (8. Mai 2012).

liefern sollen. Zweitens mündete die Wissenschaftspolitik 1984 in ein vom Volk akzeptiertes Bundesgesetz über die Forschung, das den Auftrag an den Nationalfonds festschreibt, die Forschung und den wissenschaftlichen Nachwuchs zu fördern. Der SNF ging gestärkt aus den Diskussionen um Sinn und Zweck der Forschungsförderung hervor: Ab 1985 stiegen die Beiträge steil an, bis auf deutlich über 300 Millionen 1993.

Neue Nützlichkeitsbegehren

In den 1990er Jahren bekam es der SNF neuerlich mit «Nützlichkeitsbegehren» zu tun; das New Public Management stellte die Förderpolitik des Bundes unter das Primat des Effizienzgedankens. Ein neues Fördermittel, mit dem die Politik auch auf die Struktur des Forschungsplatzes einwirken konnte, wurde eingeführt: die Schwerpunktprogramme, die heutigen Nationalen Forschungsschwerpunkte (NFS). Heidi Diggelmann, von 1997 bis 2004 Forschungsratspräsidentin, sieht rückblickend in diesen neuerlichen Querelen um den Einfluss der Politik auf die Forschungsinhalte einen Reifungsprozess, und zwar auf beiden Seiten: «Der gegenseitige Respekt hat zugenommen, sowohl auf Seiten der Politiker wie der Forschenden.» Das SNF-Budget stieg nochmals an, aber nicht nur das: Es sieht ganz so aus, als hätte man in den vergangenen sechzig Jahren auch gelernt, konstruktiv über den Nutzen primär «unnützer» Forschung zu streiten.

Und es wird weiter gestritten werden. Für 2013 bis 2016 stehen dem SNF insgesamt 3,65 Milliarden Franken zur Verfügung, was einem Zuwachs von jährlich 3,7 Prozent entspricht. Die «Nachfrage» von Seiten der Forschenden dagegen stieg in den letzten Jahren um durchschnittlich 13 Prozent. Der SNF, der jährlich über 8000 Forschende unterstützt, braucht mehr Geld für die Forschungsförderung. ■

Palmöl aus dem Regenwald

Der Ökologe Lian Pin Koh untersucht auf Borneo, wie sich der Anbau von Ölpalmen auf die Umwelt auswirkt. Mit Drohnen hält er die Veränderungen des Regenwalds aus der Luft fest.

«Die Palmölindustrie auf der Insel Borneo setzt den Regenwald unter Druck. Täglich wird Wald abgeholzt, damit Platz für neue Ölpalmen-Plantagen entsteht. Dabei gehen Lebensräume für Tiere und Pflanzen verloren. Seit mehreren Jahren untersuche ich, wie sich die Landnutzung im indonesischen Teil von Borneo ändert und wie sie die Artenvielfalt beeinflusst.

Es ist nicht einfach, aktuelle Landnutzungskarten herzustellen. Meist geschieht dies aufgrund von Satellitenbildern. Doch in den Tropen kann man Satellitendaten nicht immer auswerten, weil über den Regenwäldern oft eine hartnäckige Wolkendecke hängt, die den Blick auf den Boden versperrt. Deshalb habe ich ferngesteuerte Flugzeuge mit Kameras entwickelt. Gemeinsam mit Naturschutzbiologen nutze ich diese Drohnen zudem für Wildtierzählungen, etwa um in schlecht zugänglichen Gebieten die Zahl der Orang-Utans zu bestimmen. Meine Drohnen haben den Vorteil, dass sie kosten-günstig aus Standardteilen gebaut sind. Sie sind daher bestens geeignet für die Arbeit in Ent-wicklungsländern.

Obschon mir daran gelegen ist, ursprüngliche Lebensräume zu schützen, verteufle ich den Anbau von Ölpalmen nicht. In Indonesien und Malaysia ist er ein wichtiger Wirtschaftszweig und Devisenbringer. Das Palmöl kommt weltweit als Bratfett und in der Nahrungsmittelindustrie zum Einsatz, etwa in Backwaren, Margarine und Süsswaren. Es ist das meistverwendete Pflanzenöl überhaupt. Indonesien und Malaysia produzieren gemeinsam 90 Prozent des Weltbedarfs.

Indonesien will die Palmölproduktion weiter steigern und bis ins Jahr 2020 verdoppeln. Das Land davon abhalten zu wollen ist illusorisch. Aber es ist möglich, die geplante Expansion so zu gestalten, dass der Einfluss auf die Umwelt möglichst gering ist. Dies ist der Fokus meiner Forschungsarbeit. Wir entwickeln nicht nur Drohnen, sondern auch Computermodelle.

Für das Beispiel des Ölpalmanbaus in Indonesien haben wir verschiedene Szenarien und ihre wirtschaftlichen und ökologischen Folgen durchgerechnet. Am meisten Gewinn bringt es, fruchtbare Regenwälder für neue Plantagen zu roden. Eine Alternative dazu ist, die Palmen auf bereits vor längerer Zeit gerodeten Landwirtschaftsflächen anzubauen. Sie konkurriert allerdings die Lebensmittelproduktion. Eine dritte Möglichkeit ist schliesslich, Ölpalmen auf nicht mehr fruchtbarem, ungenutztem Ackerland zu pflanzen. Dafür ist ein höherer Düngereinsatz nötig, was die Wirtschaftlichkeit schmälert. Doch der Druck auf die Regenwälder ist bei dieser Variante am geringsten, und die

Der Preis des Sonntagsbratens: Mit seiner Drohne (oben im Test über dem Greifensee) kann Lian Pin Koh zeigen, wo der Regenwald für Palmölplantagen gerodet wird (links) und was die Folgen für die Wildtiere sind.
Bilder: Lian Pin Koh

Nahrungsmittelsicherheit bleibt ausser Gefahr. Man muss ein Gleichgewicht von Wirtschaftlichkeit und Ökologie finden. Ich anerkenne beide Aspekte. Sie zu vereinen war schon immer mein Ziel. Ich komme aus Singapur, dem am stärksten entwickelten Land Südostasiens, und konnte dort die Vorzüge der industriellen Entwicklung geniessen. Doch ich bin mir auch der ökologischen Kehrseite dieser Entwicklung bewusst.

Nach einem Aufenthalt in den Vereinigten Staaten bin ich vor vier Jahren an die ETH Zürich gekommen. Heute bin ich dort als SNF-Förderprofessor angestellt. Diese Stelle bietet mir eine grosse Freiheit. In vielen anderen Ländern hätte ich es mit meiner fächerübergreifenden Forschung wohl schwierig, da die Forschungsfinanzierung dort häufiger als in der Schweiz an traditionelle Disziplinen geknüpft ist. Der Nachteil meiner Stelle ist, dass sie auf vier bis maximal sechs Jahre befristet ist. Der Weg zu einer Vollprofessur ist nicht vorgespurt. Ich werde mich also nach Ablauf dieser Zeit irgendwo auf der Welt auf einen offenen Lehrstuhl bewerben müssen. Ich finde es gut, dass die Schweiz junge Talente aus dem Ausland fördert. Doch sie tut zu wenig, um sie zu behalten.

Was die geografische Lage der Schweiz betrifft, so ist sie für meine Arbeit ideal, da sie zwischen den USA, wo ich immer noch Kontakte habe, und Asien liegt, wo der Schwerpunkt meiner Feldforschung ist. Bald wird möglicherweise noch Feldforschung in Afrika dazukommen. Ich möchte auch dort meine Drohnen für Wildtierzählungen einsetzen. Heute zählen dort Naturschutzbiologen Tiere, indem sie in bemannten Flugzeugen über die Savanne fliegen, was teuer ist. Mit den Drohnen könnte man das billiger machen. ■

Aufgezeichnet von Fabio Bergamin

Forschung im Kuhstall

Kühe sind zu leistungsfähigen Milchlieferantinnen herangezüchtet geworden. Das überfordert oft ihren Stoffwechsel, besonders nach der Geburt eines Kalbes.

Von Ori Schipper

Negative Energiebilanz: Mit schlechter Aura hat das für einmal nichts zu tun. Denn der Fachbegriff aus der Ernährungslehre beschreibt den Sachverhalt, dass ein Organismus manchmal mehr Energie verbraucht, als er mit der Nahrung einnehmen kann. «Viele Frauen hoffen, beim Stillen die in der Schwangerschaft angereicherten Kilos loszuwerden. Kühe dagegen müssen ihren Stoffwechsel umstellen, um nicht abzunehmen. Die ersten Wochen nach der Geburt eines Kalbes sind deshalb für den Stoffwechsel der Kühe sehr belastend», sagt Rupert Bruckmaier.

Seine veterinärphysiologische Forschungsgruppe gehört zwar der Universität Bern an, betreibt aber eine Versuchsstation in Posieux im Kanton Freiburg. Die eidgenössische Forschungsanstalt für Nutztiere liegt ziemlich abgelegen: Um einen Parkplatz mitten im Grünen sind die Tierställe, ein Gästehaus und ein grosses Laborgebäude verteilt. In den mit modernen Analysegeräten eingerichteten Laboratorien untersucht die Forschungsgruppe den Energiehaushalt von Milchkühen.

Wenn nach dem Kalben die Milch einschiesst, führt dies bei den Kühen zu einer Unterzuckerung des Blutes und zu einer fundamentalen Umstellung des Stoffwechsels. Weil der in der Nahrung enthaltene Zucker kaum ins Blut gelangt, sondern von den Bakterien im Vormagen und im Magen der Kühe zersetzt wird, muss die Leber den grössten Teil des Blutzuckers neu herstellen. Dieser ist deshalb oft Mangelware – umso mehr, als der Bedarf in den letzten Jahrzehnten ständig gestiegen sei, weil die Züchtung auf eine immer höhere Milchleistung ziele, erklärt Bruckmaier.

Ein Todesfall

Seiner Forschungsgruppe steht ein Versuchsstall zur Verfügung, der ungefähr dreissig Kühen Platz bietet. «Das sind paradiesische Verhältnisse, um die uns weltweit viele Kollegen beneiden», sagt Bruckmaier. Im Moment steht der Stall jedoch leer. Das letzte Experiment ihrer Versuchsreihe haben die Forschenden abgebrochen, nachdem eine Kuh verstorben war. Bis Klarheit über die Todesursache herrscht, nehmen die Forschenden den Versuch nicht wieder auf. «So ein Verlust geht uns nahe», sagt Bruckmaier. «Wir forschen hier seit vielen Jahren und hatten noch nie einen Todesfall.»

Für die Versuche verabreichten die Veterinärphysiologen sechs Kühen jeweils zwei Tage lang Insulin. Eine Kontrollgruppe von weiteren sechs Kühen erhielt nur eine Salzlösung. Das Insulin senkt den Blutzuckerspiegel. Die Forschenden versetzten dadurch den Stoffwechsel der Kühe in den Zustand, in dem er sich ungefähr zwei bis drei Wochen nach dem Kalben befindet. Das ist nicht einfach, denn die Menge Insulin, die durch einen dünnen Plastikschlauch in die Halsvene träufelt, muss kontinuierlich an den Blutzuckerspiegel angepasst werden. Um diesen (und viele andere Werte) zu messen, entnehmen die Forschenden den Kühen alle fünf Minuten eine Blutprobe, rund um die Uhr. «Mehrere Doktoranden wechseln sich ab», sagt Bruckmaier. Damit sie mit den Proben nicht vom Kuhstall zu den Laborräumen der Versuchsstation auf der gegenüberliegenden Seite des Parkplatzes hasten müssen, hat die Forschungsgruppe ein Analysegerät in einer Kammer im Stall installiert. Auch eine Pritsche steht dort. Für die Ruhepause, wenn endlich die Ablösung an der Reihe ist.

Dass die Milchleistung der Kühe mit tiefem Blutzuckerspiegel in den zwei Behandlungstagen absinkt, überrascht nicht. «Wenn die Kuh weniger Zucker im Blut hat, kann sie weniger Milchzucker bilden», sagt Bruckmaier. Schwieriger zu interpretieren sind die molekularbiologischen Messwerte, welche die Forschenden beim Testen des Immunsystems der Kühe erhoben haben. Dieses spielt kurz nach der Geburt des Kalbes eine wichtige Rolle, weil sich dann oft Bakterien in den Euterzitzen der Kühe einnisten. Dadurch entzündet sich die Milchdrüse. Die Forschenden täuschten eine solche Infektion der Milchdrüse vor, indem sie Zellwandbestandteile von Bakterien in das Eutergewebe spritzten. Die darauffolgende Entzündungsreaktion führte zu einer vorübergehenden Insulinresistenz: Wenn sich die Körperzellen nicht mehr dazu bewegen lassen, den Zucker im Blut aufzunehmen, schiesst der Blutzuckerspiegel wieder hoch. Damit schanzt sich das Immunsystem mehr Energie zu für seinen Abwehrkampf gegen die Erreger, vermuten die Forschenden.

Was sie in ihrem Projekt entdeckten, könnten die Landwirte nicht unmittelbar nutzen, es gehe um Grundlagenforschung, sagt Bruckmaier. Die Resultate sollten jedoch längerfristig dazu beitragen, den Stoffwechsel der Kühe zu stabilisieren und die Funktion des Immunsystems gezielt zu beeinflussen. So könne der Einsatz von Medikamenten hoffentlich reduziert werden. Zu diesem Ziel führten verschiedene Wege, sagt Bruckmaier. Erstens liessen sich vielleicht bessere Fütterungsstrategien entwickeln, auch wenn der komplizierte Verdauungstrakt der wiederkäuenden Kühe einfache Lösungen verhindere.

Zweitens könnte die Züchtung vermehrt auf einen anpassungsfähigen Stoffwechsel und ein gut funktionierendes Immunsystem achten. «Mit den heutigen Hochleistungskühen ziehen wir Menschen Profit aus dem Umstand, dass die Kühe in ihrer Evolution schon immer höchste Priorität auf das Überleben ihres Nachwuchses und damit die Milchproduktion gesetzt haben», sagt Bruckmaier. Den Kühen ist zu wünschen, dass sie dies in Zukunft wieder tun können, ohne ihre Gesundheit aufs Spiel zu setzen. ■

Im Dienst der Artgenossen – und des Menschen: Die Kuh links hält still für die Entnahme einer Blutprobe, die Kuh oben für die Ultraschallmessung.
Bilder: Hans-Christian Wepfer/Lab25

Tierversuche der anderen Art

Wer mit Kühen forschen möchte, muss wie bei Versuchen mit Mäusen beim kantonalen Veterinäramt ein Bewilligungsgesuch einreichen. Weitere Ähnlichkeiten sind jedoch kaum auszumachen. Um zu seinen Versuchskühen zu kommen, kauft Rupert Bruckmaier Bauern gesunde Kühe der Rasse Holstein oder Swiss Fleckvieh ab, die zur Schlachtung vorgesehen sind. Anstatt ihr Leben für unsere gedeckten Tische zu lassen, dienen sie der Forschung: Die Kühe kommen nach Posieux in den Versuchsstall, wo sie sich zwei Wochen lang an ihre neue Umgebung gewöhnen, bevor sie als Versuchskaninchen dienen. Nur weil Schlachttiere deutlich preiswerter sind als wertvolle Zuchttiere, kann sich die Forschergruppe Milchkühe als Versuchstiere leisten. **ori**

Elend am Zürcher Lettensteg: Das Ausleihen der Spritzen unter den Drogenkonsumenten förderte die Ausbreitung von Aids (1993). Bild: Keystone

Gefährliche Furchtlosigkeit

Die HIV-Kohortenstudie ist als Reaktion auf Aids entstanden. Heute hat die Krankheit dank Medikamenten ihren Schrecken verloren. Gerade deshalb nimmt die Zahl der Neuinfektionen zu. *Von Vivianne Otto*

Die Angst war gross. Im Verhältnis zu ihrer Bevölkerung verzeichnete die Schweiz in den 1980er Jahren die meisten HIV-Infizierten in ganz Europa. Die Spitäler konnten den Andrang von Patienten, die an der damals noch unbekannten Krankheit litten, kaum bewältigen. Die Ärzte waren ratlos, was sollten sie tun? Sie starteten die schweizerische HIV-Kohortenstudie, um mehr über das HI-Virus und seine Ausbreitung zu erfahren. Seit 1988 sammeln Infektiologen aller fünf Schweizer Universitätsspitäler sowie der Kantonsspitäler St. Gallen und Tessin Informationen über ihre HIV-Patienten sowie deren Blutproben. Entstanden ist ein weltweit einzigartiger Wissensfundus zu HIV.

Anfänglich waren die meisten HIV-Infizierten Drogenkonsumenten. Das Virus breitete sich dank regem Spritzentausch in der offenen Drogenszene auf dem Zürcher Platzspitz – dem berüchtigten und weltberühmten «Needle Park» – rasch aus. Die zweitgrösste Gruppe der Infizierten waren homosexuelle Männer, dicht gefolgt von Heterosexuellen. Von der Ansteckung bis zum Ausbruch von Aids dauerte es durchschnittlich neun Jahre. Im Schnitt erlagen die Erkrankten innerhalb von zwei Jahren ihrem Leiden.

Sextourismus und Migration

Dies änderte sich 1996, als neue Medikamente verfügbar wurden. In Kombination mit den älteren Wirkstoffen dezimierten diese die HI-Viren so sehr, dass sie im Blut nicht mehr nachweisbar waren. Behandelte Patienten waren kaum mehr ansteckend, ihre Lebenserwartung glich sich der der Allgemeinbevölkerung an. Auch die Prävention mit Kondomen und sauberen Spritzen trug Früchte. Die Zahl der HIV-Neuansteckungen sank deutlich und pendelte sich bei 700 bis 800 pro Jahr ein. Es schien, als hätte man das Virus im Griff.

Doch seit 2000 nimmt die Zahl der Neuinfektionen wieder zu. «Die Leute gehen wieder grössere Risiken ein», sagt Huldrych Günthard, Leiter der Schweizerischen HIV-Kohortenstudie. «Sie brauchen seltener Kondome und sind weniger bereit, sich HIV-Tests zu unterziehen. Deshalb sind auch andere sexuell übertragbare Krankheiten wie Syphilis und Hepatitis C auf dem Vormarsch.»

Aufgrund der Gensequenzen, die sich in den Blutproben bestimmen lassen, wissen die Ärzte um Günthard, wie sich die HI-Viren ausbreiten konnten. Die Infektionen der Drogenkranken gehen auf nur wenige infizierte Individuen zurück, welche die anderen ansteckten. Bei den Homosexuellen sind mehr unterschiedliche Virenfamilien in Umlauf. Und bei den Heterosexuellen treten öfter HI-Viren auf, die aus Südostasien oder Afrika stammen – ein Hinweis, dass auch Sextourismus und Migration zur Schweizer HIV-Epidemie beitragen.

Auch die Wirksamkeit und die Nebenwirkungen der Therapie bei unterdessen älteren Patienten, die diese Medikamente schon seit Jahren einnehmen, werden heute erforscht. Die HIV-Kohortenstudie dient somit drei Zwecken: dem medizinischen, die Therapie stetig zu verbessern, dem wissenschaftlichen, HIV und Aids zu erforschen, und einem gesellschaftlichen. «Wenn wir die Kontrolle über HIV verlieren, stehen wir bald wieder vor einer ebenso bedrohlichen Situation wie in den 1980er Jahren», warnt Günthard. ■

Trainieren gegen Autismus

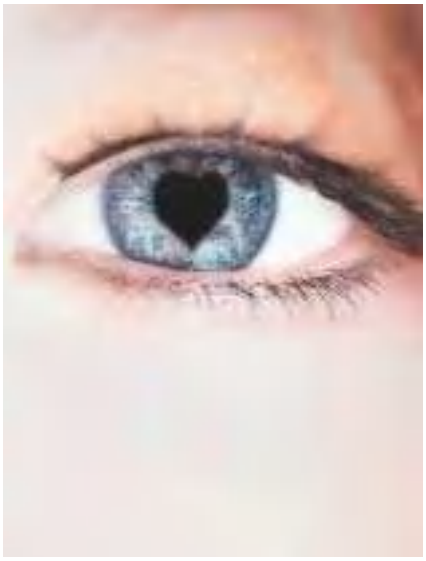
Im Film «Rain Man» spielt Dustin Hoffman eine Person, der – wie allen Autisten – der soziale Instinkt fehlt. Während die Symptome des Autismus bekannt sind, geben die dafür verantwortlichen Mechanismen im Gehirn Rätsel auf. Nouchine Hadjikhani, SNF-Förderungsprofessorin an der ETH Lausanne, versucht sie zu lösen. Ihre Gruppe legte autistischen Versuchspersonen und einer Kontrollgruppe (je rund 20 Personen) Bilder von Gesichtern vor, die Gefühle ausdrücken. Die Forschenden nahmen die Hirnaktivitäten mit einem Computertomografen auf und zeigten, dass Hirnregionen mit Spiegelneuronen, die zum Erkennen von Absichten und Gefühlen anderer wichtig sind, bei Autisten nicht spontan aktiviert werden. Zudem wiesen sie nach, dass die Anomalien der weissen Substanz des Gehirns, die in anderen Studien bei autistischen Kindern bereits vor der Geburt festgestellt wurden, mit dem Alter abnehmen. Autismus entsteht also nicht durch eine «schlechte» Mutter-Kind-Beziehung, sondern ist eine entwicklungsneurologische Krankheit. Die geeignete Behandlung besteht demnach aus kognitiven Übungen und dem Erlernen von Verhaltensmustern. Gemäss Nouchine Hadjikhani sollten diese Übungen individuell so angepasst werden, dass Hirnregionen trainiert werden, die für die Imitation und das Verständnis von Gefühlen wichtig sind. **Anne Burkhardt**

Christof Sonderegger

Unterschätzte Kommunikationsfähigkeit: Ziegen gleichen ihre Rufe untereinander an (Sertigtal, 2007).

Sozial meckern

Nach den Walen und den Fledermäusen ist es nun an den Ziegen, die Geheimnisse ihrer Sprache preiszugeben. Im Rahmen eines Postdoktorats an der Queen Mary (University of London) konnte Elodie Briefer zeigen, dass ein Zicklein seinen Akzent der Gruppe anpasst, in der es aufwächst. «Ziegengeschwister geben ähnlichere Laute von sich als Halbschwestern und -brüder, was eine genetische Komponente des Ziegenrufs belegt», sagt die Forscherin. Halbgeschwister jedoch, die in verschiedenen Gruppen aufwachsen, passen ihre Laute den Tieren an, mit denen sie zusammen sind. Junge Ziegen können also ihr Meckern dem sozialen Umfeld anpassen. Die Laute von 23 Zicklein wurden je nach einer Woche und nach fünf Lebenswochen aufgezeichnet. In der Natur bleiben die Jungen in den ersten Tagen nach der Geburt vor Tieren versteckt, die ihnen gefährlich werden könnten. In dieser Zeit geben sie Kontaktschreie von sich, um ihre Mutter zu rufen. Mit fünf Wochen stossen sie zu Gruppen, die aus mehreren Zicklein bestehen. Ihre Rufe dienen nun der Bindung innerhalb der Gruppe. «Im Lauf der Zeit gleichen sich die Rufe immer mehr an», sagt Elodie Briefer. Bei Ziegen spielt die Verständigung eine wichtige Rolle, da die Tiere in einer komplexen Struktur leben: Sie verbringen den Tag in kleinen Gruppen und kommen am Abend wieder zusammen. Die Anpassungsfähigkeit ihrer Stimme ist ein Evolutionsschritt hin zu feineren sprachlichen Fertigkeiten, wie sie die Menschen besitzen. **Mirelle Pittet**



Frank Heinzelmann/prismaonline.ch

Schau mir ins Auge, Kleiner: Unter dem Einfluss von Ecstasy nimmt man das Wohlwollen des Gegenübers besser wahr.

Wohlfühlpille Ecstasy

Wer unter dem Einfluss von Ecstasy steht, nimmt die positiven Gefühle der Mitmenschen um ihn herum besser, die negativen aber schlechter wahr. Im Licht dieser Resultate der Forschungsgruppe um Matthias Liechti vom Universitätsspital Basel ist die rasante Verbreitung der Partydroge in der Rave- und Technoszene gut nachvollziehbar. Die Forschenden verabreichten 48 freiwilligen Probandinnen und Probanden Pillen, die entweder MDMA – die chemische Bezeichnung für Ecstasy – oder Milchzucker, also ein Placebo, enthielten. Anderthalb Stunden später schauten die Versuchsteilnehmer auf einen Bildschirm, von dem ihnen nacheinander 36 verschiedene Augenpartien entgegenblickten. Die zusammengekniffenen oder weit aufgerissenen Augen hatten sie dahingehend zu deuten, was der Person zum Zeitpunkt der Fotoaufnahme durch den Kopf gegangen war. Die neutralen Mienen konnten beide Gruppen gleich gut einordnen, während die Personen unter Ecstasyeinfluss etwa das Wohlwollen in den Augen besser, aber die Wut schlechter erkannten als ihre nüchternen Kollegen. Ähnliche Beobachtungen machten andere Wissenschaftler bei Versuchen, in denen sie den Teilnehmenden Oxytocin in die Nase sprühten, das Hormon, das beispielsweise die Mutter-Kind-Beziehung chemisch kittet, wenn es von der Mutter beim Stillen freigesetzt wird. Auch das Team um Liechti konnte einen Anstieg des «Kuschelhormons» im Blut der Personen messen, die versuchshalber Ecstasy konsumiert hatten. Der Schluss, dass die neu entdeckten Wirkungen von Ecstasy durch Oxytocin verursacht werden, liegt nahe. **ori**

Mit der Zunge gegen böse Feinde

Eretria in Griechenland ist ein Zentrum der schweizerischen Archäologie. Ihre Grabungen legen die mehrere tausend Jahre alte Geschichte der Stadt frei. *Von Elisa Hübel*

Stein an Stein reihen sich die Grundmauern antiker Gebäude. Wie mit dem Lineal gezogen zieht sich eine freie Schneise durch diese Steinquader. Vor etwa 2400 Jahren befand sich hier eine Strasse. In einer Toreinfahrt kann man sogar eine Steinplatte erkennen, auf der sich die Räder von Pferdekarren mit Rillen verewigt haben. Heute grenzt dieser Ort an das etwa 3000 Einwohner zählende Provinzstädtchen Eretria auf der Insel Euböa. Es liegt etwa 45 Kilometer Luftlinie von Athen entfernt.

Ausgegraben worden ist dieses Areal von der Schweizerischen Archäologischen Schule in Griechenland (Esag). Robert Arndt ist ihr wissenschaftlicher Sekretär. «Eretria ist unsere Vorzeigegrabung», sagt der gebürtige Berliner, der in Luzern aufgewachsen ist. Er steht vor Steinfunden, sein blondes Haar ist kurz geschnitten, er trägt ein lässiges dunkelblaues T-Shirt mit der Aufschrift der Esag. Mit der Hand weist er nach Westen, wo in antiken Zeiten die Stadtmauer stand. Dann zeigt er auf einen kleinen Hügel gen Norden, wo weitere Überreste des einst imposanten Walls das Landschaftsbild prägen. Der 33-jährige Archäologe, der bereits in Jemen, Kambodscha, Tunesien und auf Kreta gegraben hat, erklärt: «Die vier Kilometer lange Mauer begann am westlichen Teil des Stadthafens, lief über den Hügel weiter und endete östlich des Hafens.» Somit besetzte die antike Stadt ungefähr das Territorium, über das sich auch das heutige Eretria erstreckt.

Das luxuriöse Mosaikenhaus

Ein paar Minuten entfernt liegt eine weitere Ausgrabungsstätte. Hier haben die Schweizer Archäologinnen und Archäologen ihren vielleicht bedeutendsten Fund gemacht: das Mosaikenhaus. «Es handelt sich um das luxuriöseste Haus der Stadt, wenn auch nicht um das grösste», meint Arndt, der von 1998 bis 2004 in Bern klassische Archäologie studiert hat. Seinen Namen erhielt das 670 Quadratmeter grosse Gebäude, weil es mehrere kunstvolle Bodenmosaiken aufweist, für die Meereskiesel verwendet wurden. Abbildungen von Fabelwesen und Pflanzen dominieren. Das Bildnis eines Gorgonenkopfs mit ausgestreckter Zunge soll vor Feinden schützen. Die Mosaiksteine schimmern in ihren Naturfarben weiss, schwarz, rot und gelb.

Direkt neben dem Mosaikenhaus liegt die aktuellste Ausgrabung: römische Thermen. Karl Reber, Professor für klassische Archäologie an der Universität Lausanne und seit 2007 Direktor der Esag, erklärt, dass diese Thermen vor zwei Jahren entdeckt wurden: «Daraus ergeben sich neue Erkenntnisse über das Weiterleben Eretrias in römischer Zeit.» Mit Nachdruck weist er darauf hin, dass die Esag ein gesamtschweizerisches Projekt sei, an dem sich alle Schweizer Universitäten beteiligten. In der Schweiz, so Reber, «arbeitet ein Team von festen Mitarbeitern an der Planung, Realisierung und Dokumentation unserer Forschungsarbeiten». Die Esag, fügt er stolz hinzu, sei das einzige archäologische Institut

Vergangenes in die Gegenwart holen:
Archäologen legen in Eretria eine römische Bäderanlage frei (2010). Rechts eine Preisamphora aus dem Museum, um 360 v. Chr.
Bild: unil.ch/esag, Archäologisches Museum, Eretria

der Schweiz mit festem Sitz im Ausland. Bewundern kann der interessierte Besucher die Funde im Museum von Eretria, das Kenner als eines der schönsten griechischen archäologischen Provinzmuseen bezeichnen. Hier ist es kühl, die Augen empfinden den Wechsel von der gleissenden Sonne in das Licht des Raumes als angenehm. Ausgestellt sind Statuen, Grabbeigaben, Urnen, Speerspitzen, Gefässe, Webgewichte, Öllampen und Münzen. «Natürlich sieht man hier nur einen kleinen Teil der Funde. Etwa 90 Prozent der Objekte liegen im Magazin», sagt Arndt.

Hier forschen die Schweizer fast das ganze Jahr über direkt an den Fundobjekten: «Auch Doktoranden von Schweizer Universitäten erhalten während der Wintermonate die Gelegenheit, die Funde aufzuarbeiten», sagt Arndt. Die Grabungszeit im Sommer sei leider sehr knapp bemessen. Archäologische Schulen aus dem Ausland dürfen laut den griechischen Gesetzen lediglich eineinhalb Monate im Jahr graben. Die Esag legt diese Periode meist auf die Semesterferien der Schweizer Universitäten im Sommer. Dann kommen etwa 15 Studenten, die in Ausgrabungstechnik ausgebildet werden.

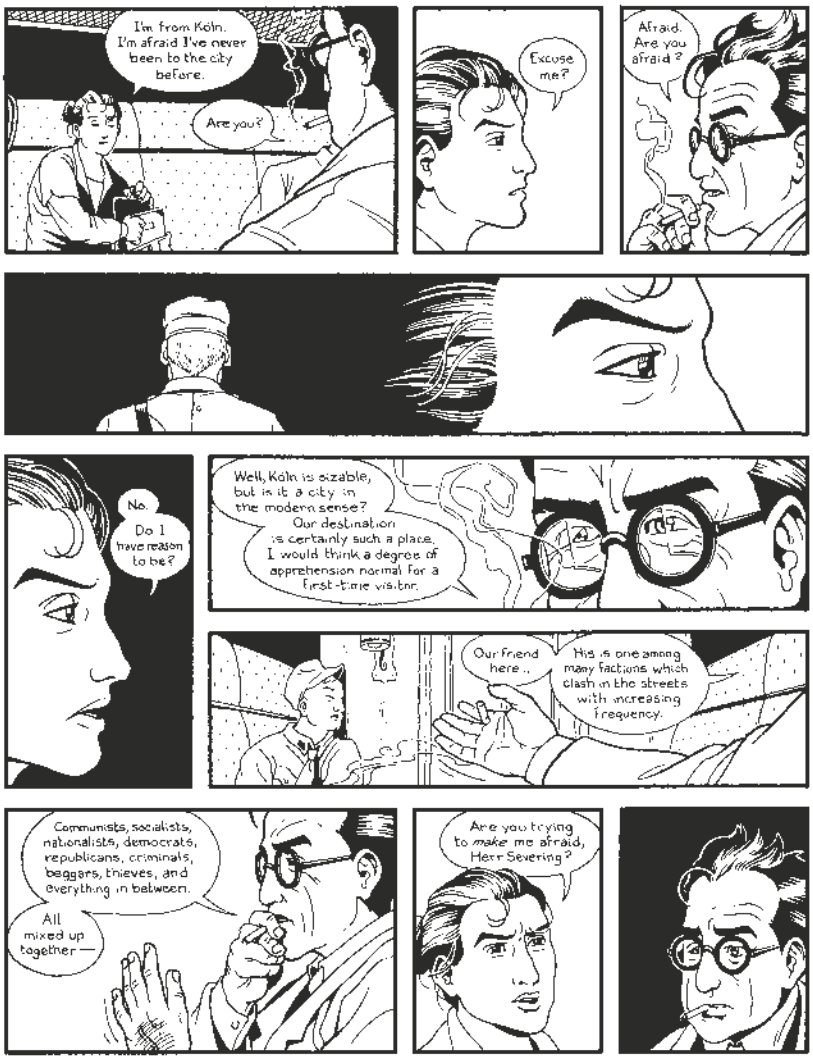
Ins Nationalmuseum von Athen

Zwischen den schweizerischen Universitäten und der Esag gibt es in Griechenland noch weitere Kooperationsprojekte, unter anderen auf der Insel Naxos und in der Argolis auf der Peloponnes. In zwei Jahren, wenn die Esag ihr 50-Jahre-Jubiläum feiert, soll ein weiteres Projekt in Angriff genommen werden: ein archäologischer Park, der die bei Eretria verstreut liegenden archäologischen Stätten miteinander verbindet.

Begonnen hat die Geschichte der Esag 1964. Nachdem Amerikaner, die in Eretria seit 1890 aktiv waren, das antike Theater ausgegraben hatten, übernahm die Schweizerische Archäologische Mission die Arbeit. Im Jahre 1975 entstand daraus die Esag. «Seither hat sich kein anderes ausländisches archäologisches Team an den Ausgrabungen von Eretria beteiligt», sagt Arndt. Er verweist darauf, dass die Esag zahlreiche wichtige Publikationen herausgegeben habe, inzwischen über zwanzig Bände, auch in diesem Jahr seien zwei Buchproduktionen vorgesehen.

Die Finanzierung wurde in den ersten 18 Jahren ausschliesslich vom Schweizerischen Nationalfonds (SNF) bestritten. Seit 1982 wird die Esag von der Universität Lausanne geleitet. Seither steuert der SNF jährlich einen festen Betrag bei. 1983 wurde die Stiftung der Schweizerischen Archäologischen Schule ins Leben gerufen, die bis heute die Finanzierung unterstützt. Auch private Stiftungen und Spender, die Universität Lausanne, in Griechenland ansässige Schweizer Firmen und seit einigen Jahren auch der Bund – nur um einige der Geldgeber zu erwähnen – investieren in die wissenschaftliche Arbeit im antiken Eretria. Ein grosser Erfolg war für die Esag, als sie 2010 als erste der insgesamt 17 in Griechenland ansässigen ausländischen Archäologischen Schulen ihre Funde im Archäologischen Nationalmuseum von Athen ausstellen durfte.

Die Rückreise von Eretria führt viele Besucher auf die Fähre. Möwen flattern über den Köpfen der Passagiere, ein kleiner Junge streckt die Hände nach den weissen Meeresvögeln aus. Weil er sie nicht berühren kann, zeigt er ihnen seine Zunge, wie der Gorgone im Mosaikenhaus. ■



Zeitlose Stirnlocke

Comics sind nicht simpel. Als komplexe Kunstwerke unterhalten sie einen Teil des Publikums – und verschaffen einem andern Teil mittels feiner Anspielungen zusätzlichen Genuss. *Von Rea Brändle*

Seit 1938 ist Superman, als ältester der klassischen Superhelden, Monat für Monat in Action. Er müsste – da seine Abenteuer konsequent in der Jetztzeit spielen – längst in Rente sein. Dies gilt auch für den nur wenig jüngeren Kollegen Sandman, der noch immer in menschlichen Träumen unterwegs ist; eine zeitlose Figur, auch wenn ihm ab und zu von neuen Zeichnern ein verändertes Outfit verpasst wurde, mal mehr Muskeln, mal ein kühnerer Haarschnitt, wie es dem Zeitgeschmack entsprach.

Dennoch behalten die Helden unverwechselbare Merkmale. Bei Superman ist es die Stirnlocke, bei Sandman lustigerweise die Stimme: Wenn er spricht, geschieht dies immer in weisser Schrift auf schwarzem Grund. Solche Phänomene der Wiedererkennung untersuchen die Amerikanisten Stephanie Hoppeler und Lukas Etter in seriellen Comics aus den Jahren 1980 bis 2010. Ihre Dissertationen entstehen an der Universität Bern.

Auf Spielformen der Kontinuität konzentriert sich Stephanie Hoppeler. Dass Superhelden unabhängig von ihren Schöpfern zum Einsatz kommen, überrascht angesichts der Produktionsverhältnisse nicht; so besitzt der Verlag DC Universe die Rechte an sämtlichen im eigenen Imperium lancierten Figuren. Er verfügt somit über unzählige parallel laufende Serien und zudem über die Möglichkeit, einzelne Helden für eine gewisse Zeit als Gastfiguren in anderen Serien auftreten zu lassen. Dies ist nicht ganz einfach, denn in Superheldengeschichten darf es, um die Fans nicht vor den Kopf zu stossen, nie zu eklatanten Unstimmigkeiten zwischen Titel- und Gastrolle kommen. Also müssen einzelne Leute im Verlag stets die Übersicht behalten.

Spiel mit ästhetischen Mustern

Das brachte Stephanie Hoppeler auf die Frage, die auch für andere Populärmedien relevant ist: Wie erreicht man, dass Neueinsteiger jederzeit in eine Serie einsteigen können, ohne dass dies für die treue Fangemeinde langweilig wird? Ihr Ergebnis: Comics weisen die Komplexität von Kunstwerken auf, die einen Teil des Publikums schlicht unterhalten und einem andern Teil mittels feiner Anspielungen zusätzlichen Genuss verschaffen.

Lukas Etter beschäftigt sich mit ästhetischen Fragen anhand alternativer Comics der jüngsten Vergangenheit. Sein Corpus umfasst nur wenige Werke und zugleich eine grosse thematische und formale Vielfalt. Gemeinsam ist ihnen, dass sie je von der gleichen Person getextet und gezeichnet und zuerst ausserhalb des Mainstream-Marktes veröffentlicht wurden. Berühmtestes Beispiel ist das autobiografisch erzählte «Maus» von Art Spiegelman, dem Sohn eines Auschwitz-Überlebenden.

Auch Jason Lutes befasst sich mit Deutschland, genauer, mit dem Berlin der Weimarer Republik. Einen anderen Zugang zur Geschichte hat Chris Ware. Er spielt unter anderem mit ästhetischen Mustern der 1890er Jahre in «Jimmy Corrigan – The Smartest Kid on Earth», einer liebevoll gemachten Antihelden-Geschichte, wovon Teile ursprünglich im «New Yorker» erschienen sind. Für Szenenblätter schliesslich entstand «Dykes to Watch Out For» von Alison Bechdel, was ihr die Freiheit liess, formal zu experimentieren. Lukas Etter hat bei all diesen Comics, die eine unterschiedliche Aufmachung haben, auf der formalen Ebene «Aspekte der Serialität» gefunden. ■

Ausserhalb des Mainstreams: Aus Jason Lutes'«Berlin» (2008).
Illustration: © Jason Lutes/
Image courtesy of Drawn & Quarterly

Martin Rütschi/Keystone

Heftige Definitionskämpfe: Anders als die Versicherer verstehen die Hausärzte unter Qualität die Lebenswelt ihrer Patienten. (Ohrenspülung im Entlebuch, 2006.)

Qualität als Floskel?

Wenn heute von der Hausarztmedizin die Rede ist, dann meist im Zusammenhang mit zu erhöhender «Effizienz» und zu berücksichtigender «Evidenz», mit notwendiger «Kostenminimierung», «patientenzentrierter Behandlung» und so weiter. Der Kernbegriff, um den diese Ausdrücke geradezu inflationär kreisen, ist die zu verbessernde oder zumindest zu sichernde «Qualität» der Medizin. Die Medizinanthropologin Andrea Abraham von der Universität Bern kommt zum Schluss, dass die verschiedenen Akteure des Gesundheitswesens – die Hausärzte, ihre Vereinigungen, die FMH, die Gesundheitspolitiker, die Krankenversicherungen – den Qualitätsbegriff hemmungslos benutzen, darunter aber etwas je anderes verstehen. Andrea Abraham betrachtet Qualität deshalb als Teil einer «rhetorischen Strategie», die zur Legitimation eigener Interessen und Positionierungen dient. Wenn etwa die Versicherer von guter Qualität redeten, meinten sie die tiefen Kosten, während die Hausärzte zusätzlich die Lebenswelt der Patienten im Blick hätten. Der Qualitätsdiskurs ist bereits anfangs des 20. Jahrhunderts in der US-amerikanischen und der japanischen Industrie entstanden, von dort unter neoliberalen Vorzeichen nach England und den Niederlanden gewandert und schliesslich in der Schweiz angelangt. Man stecke viel Zeit, Geld und Erwartungen in Qualitätsprogramme, wie etwa die aktuelle Qualitätsstrategie des Bundes im Gesundheitswesen zeige, obschon der reale Nutzen nur schwer zu definieren sei, sagt Andrea Abraham. **uha**

Moldawien will seine Forschenden zurück

Aus der osteuropäischen Republik Moldawien wandern massenhaft kluge Köpfe ab. Heute arbeiten in der ehemaligen Sowjetrepublik noch 5500 Menschen in der Bildung und der Forschung, vier Mal weniger als 1990. Die moldawische Regierung hat den Ernst der Lage erkannt und versucht, Gegensteuer zu geben. In dem vom SNF, von der Direktion für Entwicklung und Zusammenarbeit und der moldawischen Akademie für Wissenschaften unterstützten Scopes-Projekt arbeiten auch Forschende der ETH Lausanne mit. Sie untersuchen, ob die hoch qualifizierten Auswanderinnen und Auswanderer dazu beitragen können, der moldawischen Forschung wieder auf die Beine zu helfen. Das Team um Jean-Claude Bolay und Gabriela Tejada machte rund 200 moldawische Emigranten ausfindig und befragte sie. Die Resultate zeigen, dass die meisten noch immer regelmässigen Kontakt mit der Heimat pflegen. Über 40 Prozent schicken Verwandten Geld, damit diese finanziell über die Runden kommen. Viele der ausgewanderten Forschenden haben auch schon mit Kollegen in Moldawien gemeinsame Projekte durchgeführt oder an Tagungen in der Heimat teilgenommen. Vielen fehlt aber schlicht die Zeit, um mehr für die Entwicklung der Wissenschaft in ihrem Heimatland zu tun. Und viele sind der Ansicht, dass die Regierung mehr für die Forschung unternehmen sollte. Eine Mehrheit würde gerne wieder nach Moldawien zurückkehren – angesichts der prekären finanziellen Lage und der schlechten Infrastruktur im Land glauben allerdings die wenigsten an akzeptable Berufsaussichten. **Simon Koechlin**

Martin Fejer/EST&OST

Keine Rückkehr: Viele moldawische Forschende wandern aus, würden aber gern in ihre Heimat zurückkehren (Staatliche Universität Comrat, 2007).

Dominantes Deutsch in der Bundesverwaltung

Die Schweiz kennt die drei Amtssprachen Deutsch, Französisch und Italienisch sowie die Teilamtssprache Rätoromanisch. Die Mehrsprachigkeit schlägt sich auch in der Rechtsordnung nieder. So müssen die einzelnen Sprachfassungen der Erlasse des Bundes und der vier mehrsprachigen Kantone rechtlich gleichwertig und verständlich sein – keine einfache Aufgabe, wenn man sich nur schon die Eigenheiten der verschiedenen Sprachen und die mit ihnen verbundenen kulturellen Differenzen vergegenwärtigt. Die Aufgabe wird denn auch nur zum Teil zufriedenstellend gelöst, wie eine im Nationalen Forschungsprogramm «Sprachenvielfalt und Sprachkompetenz in der Schweiz» (NFP 56) erstellte rechtswissenschaftliche Studie besagt, die nun als – selbstredend mehrsprachige – Publikation vorliegt. Das Deutsche nehme häufig eine allzu dominante Stellung ein, besonders wenn die für die Erarbeitung eines neuen Gesetzes zuständige Kommission nur einsprachig arbeite. Die Autoren empfehlen den zuständigen Stellen dringend, die Rückmeldungen der Übersetzer besser zu berücksichtigen und generell das Italienische und das Rätoromanische zu stärken. **uha**

Rainer J. Schweizer, Marco Borghi (Hg.): Mehrsprachige Gesetzgebung in der Schweiz – Législation plurilingue en Suisse – Legislazione plurilingue in Svizzera – La legislaziun plurilingua en Svizra. Dike-Verlag, Zürich, St. Gallen 2011. 519 S.

Mut zur Prognose

Bern ist auf der Landkarte der internationalen Klimaforschung eine wichtige Adresse. An der Abteilung für Umweltphysik der Universität rekonstruieren Thomas Stocker und sein Team aus uraltem Eis Klimaprozesse. *Von Felix Würsten*

Wir halten im Moment den Weltrekord», sagt der Berner Umweltphysiker Thomas Stocker stolz. 800 000 Jahre alt ist das Eis aus der Antarktis, das er mit seinem Team in den Labors der Abteilung für Klima- und Umweltphysik der Universität Bern analysiert hat. In aufwändiger Arbeit gelang es den Klimaforschern, die Konzentration der Treibhausgase CO_2 und Methan im Eis zu messen und damit einen wichtigen Datensatz für die Klimaforschung zu gewinnen. Die Messwerte zeigen, wie sich der Gehalt der Treibhausgase in der Atmosphäre im Laufe der Zeit veränderte. Und dies wiederum erlaubt wichtige Rückschlüsse, etwa wie sich Kohlenstoffkreislauf und Klima gegenseitig beeinflussen.

Zurzeit ist Thomas Stocker mit seiner Gruppe daran, die Daten aus einem zweiten Eisbohrkern aus der Antarktis auszuwerten. Dieser reicht zwar «nur» 230 000 Jahre zurück; doch da er näher am Atlantik entnommen wurde, liefert er besonders wichtige Daten. «Der Atlantik spielt im globalen Klima eine Schlüsselrolle, denn er prägt die weltweiten Meeresströme», sagt der Umweltphysiker. Die Messdaten bestätigen, dass es im Atlantik tatsächlich eine «Nord-Süd-Klimaschaukel» gibt. Rund 20 Mal habe diese Schaukel im Laufe der letzten Eiszeit hin und her geschwankt und damit immer wieder Klimaveränderungen ausgelöst. Die präzise Analyse von Umweltarchiven ist ein wichtiger Bereich von Thomas

Stockers Abteilung. Sie setzt damit eine erfolgreiche Geschichte fort, spielen die Berner Klimaforscher doch in diesem Gebiet seit langem eine führende Rolle. Das Team, das inzwischen drei Professuren umfasst, entwickelte beispielsweise neue Techniken zur Extraktion von Treibhausgasen aus Eiskernen und erweiterte das Spektrum an chemischen Elementen und Isotopen, die untersucht werden können. Läuft alles nach Plan, werden die Berner Klimaforscher auch mit von der Partie sein, wenn in einigen Jahren mit einer Bohrkampagne 1,5 Millionen Jahre altes Eis in der Antarktis aufgespürt werden soll.

Zur Berner Crew stiess Stocker Anfang der neunziger Jahre allerdings aus einer anderen Richtung. Als Spezialist für Klimamodellierung versucht er, die vielschichtigen Wechselwirkungen des Systems Erde im Computer nachzubilden. Dazu setzt der Klimaphysiker in erster Linie Modelle mittlerer Komplexität ein. Diese können die physikalischen Vorgänge zwar nicht so präzis abbilden wie die grossen Modelle der spezialisierten Rechenzentren. Doch dafür kann man mit ihnen Vorgänge simulieren, die für die grossen Modelle zu aufwändig sind. «Man kann spielen damit», meint Thomas Stocker lachend. «Diesen Aspekt vermisse ich bei den grossen Modellen.» Allerdings müsse man sich beim Spielen stets auch die Grenzen vor Augen halten: «Meiner Meinung nach machen viele Forscher den Fehler, dass sie ihre Modelle überstrapazieren und damit fragwürdige Aussagen produzieren.»

Thomas Stocker ist begeisterter Klimaforscher. Dass er in seiner Abteilung zwei verschiedene Bereiche vereint, empfindet er als grossen Vorteil: «Bei uns arbeiten sowohl Kollegen, die Daten produzieren, als auch Leute, die mit ihren Modellen Hypothesen überprüfen oder Voraussagen machen.» Die enge Zusammenarbeit erleichtert nicht nur den Austausch, sondern fördert auch den gegenseitigen Respekt: Die Modellierer realisieren, wie anstrengend es ist, einen einzelnen Messpunkt zu gewinnen. Und umgekehrt sehen die experimentellen Forscher, dass auch das Modellieren ein anspruchsvolles Handwerk ist.

Offener Review

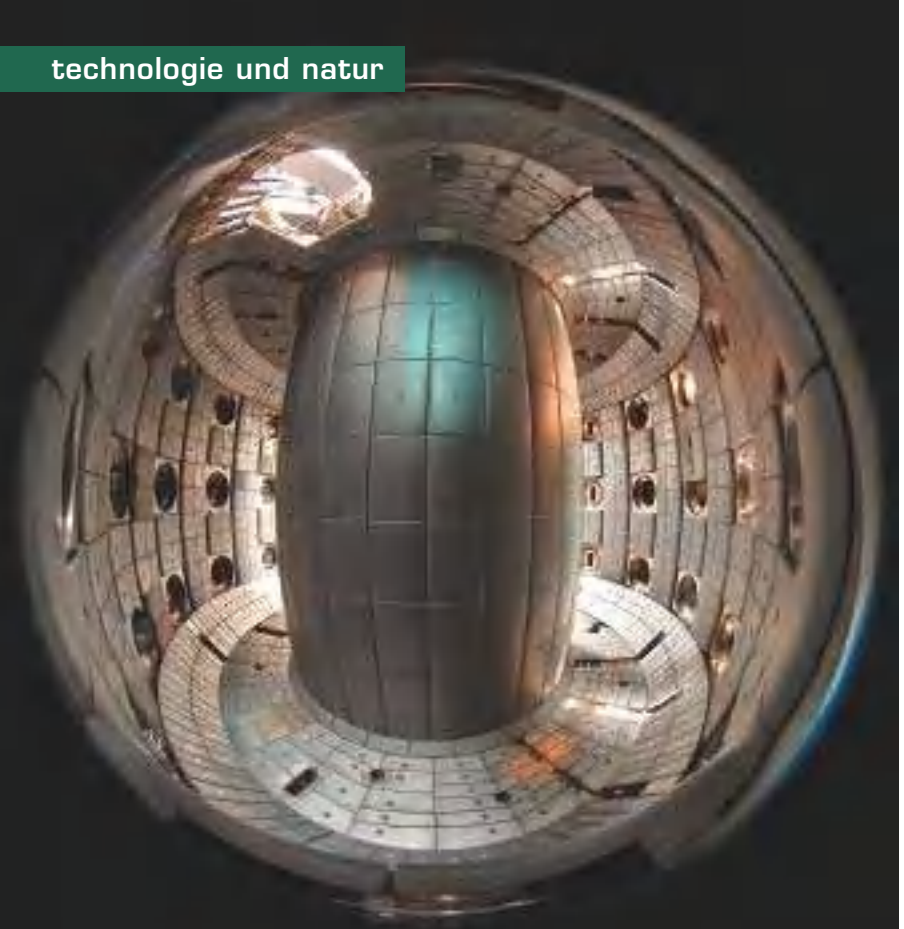
Was Stocker zurzeit am meisten auf Trab hält, sind jedoch weder Klimamodelle noch Eisbohrkerne, sondern der fünfte Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Als Co-Vorsitzender der Arbeitsgruppe «Wissenschaftliche Grundlagen» koordiniert er nicht nur die Beiträge von über 200 Autoren, sondern hält er auch den Reviewprozess in geordneten Bahnen, an dem sich über 600 Experten beteiligen. Unter Stockers Leitung wurde das Review möglichst weit geöffnet; auch kritische Journalisten oder Blogschreiber können also ihre Stimmen einbringen. Amüsiert stellt Stocker fest, dass just die lautesten Kritiker des IPCC davor zurückschreckten, sich auf eine ernsthafte Debatte einzulassen. Die Tätigkeit als Vorsitzender der IPCC-Arbeitsgruppe ist zeitintensiv. «Ich kann das neben meiner wissenschaftlichen Arbeit nur bewältigen, weil ich in meiner Gruppe selbständige Mitarbeitende habe und mich ein tüchtiges achtköpfiges Team bei den IPCC-Aufgaben unterstützt.» Bis im Herbst 2013 sollen die Arbeiten am Hauptbericht abgeschlossen sein. Danach muss der Synthesebericht fertiggestellt werden.

Rohstoff für die Klimaforschung: Eisbohrkern in einer Station in der Ost-Antarktis (links). Oben: Thomas Stocker (Mitte) an einer Pressekonferenz des IPCC (Kopenhagen 2009).
Bild: Franz Dejon/IISD (oben), Patrik Kaufmann/Uni Bern

Kleine Fortschritte

Der fünfte Sachstandsbericht werde keine fundamental neuen Erkenntnisse bringen, zieht Stocker ein erstes Fazit. «Aber wir werden zu vielen Einzelaspekten bessere Einschätzungen veröffentlichen, etwa zur Rolle der Wolken.» Ein wichtiges neues Element sind die kurzfristigen Voraussagen zum Klimawandel. Auch wenn es aufgrund der grossen Unsicherheiten schwierig sei, konkrete Aussagen über die nächsten zwanzig oder dreissig Jahre zu machen, müsse die Wissenschaft zeigen, was heute zu diesem Thema gesagt werden könne, ist Stocker überzeugt.

Der Berner Umweltphysiker spielt nicht nur im IPCC eine wichtige Rolle, sondern äussert sich auch regelmässig in der öffentlichen Debatte zu Wort. Dass er immer wieder die gleichen Argumente widerlegen müsse, sei zwar ermüdend, gehöre aber zu seinem Job. «Einzig auf beleidigende oder aggressive Anfragen reagiere ich nicht mehr.» Und er hat inzwischen auch gelernt, sich von den zäh erkämpften, aber nur kleinen Fortschritten der globalen Klimapolitik nicht mehr allzu sehr frustrieren zu lassen. «Wenn man die Vereinbarungen der letzten Klimakonferenzen im Detail studiert, sieht man durchaus Fortschritte», sagt Stocker. «Und hält man sich dann noch vor Augen, wie lang es in der Schweiz dauert, bis ein Gesetz verabschiedet ist, darf man sich nicht wundern, dass die Konsenssuche auf internationaler Ebene viel Zeit benötigt.» ■



Tüfteln mit Atomen

Das Forschungszentrum für Plasmaphysik der ETH Lausanne erforscht die Kernfusion. Diese könnte dereinst die Energieerzeugung revolutionieren.

Von Pierre-Yves Frei

Wie ein Standbild aus einem Science-Fiction-Film: Der Tokamak (TCV) des Forschungszentrums für Plasmaphysik in Lausanne, von innen gesehen.
Bild: Alain Herzog/EPFL

1961 gründete der Schweizerische Nationalfonds das Forschungszentrum für Plasmaphysik (CRPP). Die Leitung des Zentrums war fest überzeugt: Die Kernfusion hat Zukunft. Fünfzig Jahre später leistet das CRPP einen wesentlichen Beitrag für Iter, ein internationales Projekt zum Bau eines thermonuklearen Reaktors im südfranzösischen Cadarache, das zeigen soll, dass eine Kernverschmelzung während mehrerer Minuten möglich ist.

Eine nicht weniger bedeutende Rolle wird das Schweizer Labor beim geplanten Nachfolgereaktor Demo spielen, der nachweisen soll, dass sich die Fusion wirtschaftlich nutzen lässt. «Unsere Arbeiten tragen zur Entwicklung, Modellierung und Umsetzung dieser Fusionsreaktoren bei», erklärt Minh-Quang Tran, Physikprofessor und seit 1999 Leiter des CRPP. «Der Beitrag und der wissenschaftliche und technologische Input der Schweiz sind im Vergleich zur Grösse unseres Landes weit überproportional.»

Was ist eigentlich Plasma? Das ist der energetische Zustand der Materie, wie er auf der Sonne vorliegt. Dieses Gas aus Deuterium und Tritium – das teilweise aus Lithium entsteht – wird auf die unvorstellbar hohe Temperatur von ungefähr 150 Millionen Grad Celsius gebracht, bei der die Atome ihre Elektronen verlieren. Wenn die Atomkerne dieser Schutzhülle beraubt sind, können sie sich so nahe kommen, dass sie unter gewaltiger Energiefreisetzung verschmelzen.

150 Millionen Grad Celsius

Hitze ist nicht die einzige Voraussetzung. Auch der Druck spielt eine entscheidende Rolle. Das Plasma wird deshalb mit einem ungeheuren Magnetfeld wie in einen Schraubstock gezwängt. «Unsere Physiker haben sich mit ihrem Wissen in der Modellierung der Plasma-Eigenschaften für eine erfolgreiche Fusion einen Namen gemacht», sagt Tran. «Ein Trumpf ist dabei unser Tokamak (TCV). Er erzeugt den Magnetfeldkäfig, der für die Kernverschmelzung erforderlich ist. Dank seiner variablen Geometrie lassen sich verschiedene Plasmaformen und deren Erhitzung untersuchen.»

Anfang Jahr hatte das CRPP erneut Anteil am Erfolg des Unternehmens Fusion. Für die Physiker sind Instabilitäten im Plasma störend, da diese nicht nur den Fusionsvorgang, sondern auch die Komponenten in der Nähe des hyperheissen Gases gefährden. Die Lausanner Forscher haben nun eine «Multifunktionsantenne» entwickelt, die elektromagnetische Wellen aussendet und damit sich anbahnende Instabilitäten «beruhigt». Zur Erzeugung dieser elektromagnetischen Strahlung war die Entwicklung ultraleistungsfähiger Quellen erforderlich.

Diese Erkenntnisse werden Iter zweifellos weiterbringen. Ebenso wie der Test der Supraleiter für Iter und Demo – eine Aufgabe, die dem CRRP vom europäischen Partner anvertraut wurde. «1978 unterzeichnete Bern das Assoziierungsabkommen mit Euratom», sagt Tran. «Die Mitwirkung an Jet gestern, Iter heute und Demo morgen verlieh der Fusionsforschung in der Schweiz entscheidende Impulse. Sie trägt dazu bei, dass der Menschheit vielleicht eines Tages eine erneuerbare, umweltfreundliche Energiequelle zur Verfügung steht.»

Vor dem ersten Fusionsexperiment mit Iter, das etwa für 2027 vorgesehen ist, steht noch viel Arbeit an. «Ich bin sicher, dass wir Fusionsreaktionen während etwa einer Stunde werden beobachten können und nicht nur während einiger Mikrosekunden wie zu Beginn meiner Laufbahn. Dies wird ein neues Zeitalter der Energiegewinnung einläuten», sagt Tran. ■

Patrick B. Kraemer/Keystone

Technisch unterstützte Koordination: Die Diskussion um die Zulässigkeit der Schwimmanzüge dürfte bald neuen Stoff erhalten (Tenero, 2009).

Schneller schwimmen mit Sensoren

In einem Schwimmwettkampf zählt jede Zehntelsekunde. Die Trainer dürfen bei der Vorbereitung der Athleten nichts dem Zufall überlassen. Ein Hightech-Sensor soll sie nun bei dieser Aufgabe unterstützen.

Das in den Schwimmanzug integrierte System «Physiolog® III» umfasst Beschleunigungsmesser und Gyroskope, deren Signale dem Trainer aufschlussreiche Informationen beispielsweise über die Geschwindigkeit und die Koordination der Bewegungen liefern. Die Forschenden des Laboratoriums für Bewegungsmessung und -analyse der ETH Lausanne und der Universität Lausanne, die das System entwickelten, mussten jedoch einige Hürden bewältigen. «Im Wasser gibt es keine Stützphase. Modelle für die Fortbewegung auf dem Boden liessen sich deshalb nicht verwenden», sagt Kamiar Aminian, Direktor des Laboratoriums. «Ausserdem mussten die biomechanischen Besonderheiten beim Schwimmen berücksichtigt werden.» Das unter Mithilfe des Schwimmteams «Lausanne Natation» getestete System wird vor der Vermarktung weiterentwickelt. Es könnte sich nicht nur für das Schwimmtraining im Breiten- und Spitzensport als wertvoll erweisen, sondern auch im medizinischen Bereich bei der Rehabilitation im Wasser. **Elisabeth Gordon**

Quantenkryptografischer Wettkampf

Die Quantenkryptografie hat sich ihrer Unangreifbarkeit gerühmt – bis 2010 norwegischen Forschern das Undenkbare gelungen ist: zwei kommerziell angebotene Systeme auszuspielen, von denen eines vom Genfer Start-up IDQuantique vertrieben wird. Die Wissenschaftler nutzten eine Schwäche aus, um zusätzliche Informationen zu gewinnen und den geheimen Schlüssel zu knacken, wie ein Dieb, der einen Pin-Code aufgrund der Geräusche errät, welche die Finger auf der Tastatur des Bankomaten erzeugen. «Die Quantenkryptografie ist zu 100 Prozent sicher, aber nur theoretisch und mit idealen Geräten», erklärt Renato Renner von der ETH Zürich. «In der Praxis ist dies niemals der Fall. Die norwegischen Forscher haben die Tatsache genutzt, dass die verwendeten Fotonendetektoren nicht perfekt sind. Indem sie diese mit einem Laser blendeten, gelang es ihnen, sich unbemerkt zwischen Sender und Empfänger des geheimen Schlüssels zu schleichen.»

Im Januar 2012 zeigte Renato Renner in «Nature Communications», dass ein kryptografisches System tatsächlich zuverlässig sein kann. «Es reicht, wenn die Detektoren ein bestimmtes Mass an Effizienz erreichen», sagt der Physiker. «Dann ist das System sicher, selbst wenn nicht alle anderen Einzelheiten der Geräte bekannt sind.» Einer der Autoren des Artikels, Nicolas Gisin von der Universität Genf, ist besonders daran interessiert, diese Detektoren zu verbessern: Er hat 2001 das Genfer Unternehmen gegründet. **Daniel Saraga**

Eric Martin/Le Figaro Magazine/Dukas

Können Pflanzen hören? Ein Angehöriger der Maori führt Besucher durch den Waipoua-Wald, ein Musikinstrument spielend (Neuseeland, 2010).

Heilige Bäume als Klimazeugen

Der Kauri ist der grösste Baum Neuseelands. Manche Exemplare erreichen Durchmesser von fünf Metern oder mehr. Der Kauri spielt in der Mythologie der Maori eine wichtige Rolle. Die mitunter mehrere tausend Jahre alten Waldriesen werden als Gottheiten verehrt. Und sie erzählen auch für Klimaforscher äusserst interessante Geschichten. Der Kauri weist charakteristische Jahrringe auf und zeichnet damit die regionalen klimatischen Bedingungen exakt auf. Damit lassen sich Jahrringkalender rekonstruieren, die viele Jahrhunderte zurückreichen und klimatische Schwankungen detailliert aufzeigen. Ein internationales Forscherteam, an dem auch der Waldökologe Jan Wunder von der ETH Zürich beteiligt war, hat diese natürlichen Aufzeichnungen nun auf Zusammenhänge mit dem nur fragmentarisch entschlüsselten El-Niño-Phänomen untersucht. Dieses Zirkulationssystem von Ozean und Atmosphäre im Pazifikraum – korrekt El Niño/Southern Oscillation (Enso) – sorgt für quasizyklische Veränderungen im Klima und kann verheerende Auswirkungen auf lokaler Ebene haben: Trockenheit mit Ernteeinbrüchen und Waldbränden, Wirbelstürme und Überschwemmungen. Man vermutet, dass die Klimaerwärmung die Enso-Aktivität verstärkt; nachweisen liess sich das bis anhin kaum. Die aus den Kauri-Stämmen gewonnenen Daten lassen nun tatsächlich darauf schliessen, dass das 20. Jahrhundert das Enso-aktivste der letzten 500 Jahre war. Zudem zeigen die Daten, dass mit einer noch stärkeren Enso-Aktivität gerechnet werden muss, wenn die Temperaturen weiter ansteigen. **Roland Fischer**

«Die **Note** reduziert die **Transparenz**»

Das Peer-Review funktioniert nicht nach rein rationalen Kriterien – und garantiert damit den Betrieb des Wissenschaftssystems, sagt der Soziologe Martin Reinhart.

Von Urs Hafner, Bild Derek Li Wan Po

Herr Reinhart, das Peer-Review hat in der Wissenschaftswelt einen Fetisch-Status: Die von ihm gutgeheissene Forschung gilt allgemein als gut, die von ihm abgelehnte Forschung als schlecht. Beseitigt die Forschergemeinde mit diesem System Unsicherheiten über die schwierige und manchmal unmögliche Bewertung von Forschung?

Fetisch würde ich nicht sagen, auch wenn das Peer-Review in der Forschungsförderung eine fast unmögliche Aufgabe leistet, nämlich dem Versprechen des Antragstellers zu glauben, in einem unbekannten Gebiet etwas Neues herauszufinden. Das Verfahren gibt es schon seit über 350 Jahren und in allen Disziplinen und in allen Nationen. Diese Konstante ist erstaunlich für das sich permanent verändernde Feld der Wissenschaften, das sich durch die Entdeckung des Neuen auszeichnet. Das Verfahren verleiht den von ihm akzeptierten Objekten automatisch eine Validität, unabhängig davon, wie gut es funktioniert. Auch ein schlechtes Peer-Review hat eine grosse soziale Kraft. Allerdings darf es nicht permanent schlecht sein, sonst würde die Wissenschaftlergemeinde aufbegehren.

Was ist ein schlechtes und was ein gutes Peer-Review?

Das kann ich nicht sagen. Das Verfahren hat sich seit dem Zweiten Weltkrieg stark formalisiert. Verbreitet ist heute das Modell, wonach es mindestens drei Gutachter aus dem engsten Fachbereich und einen Mehrheitsentscheid braucht. Vorher hat bei manchen Zeitschriften eine Fachgrösse allein über die Publikation eines Artikels entschieden.

Weshalb ist es zu dieser Formalisierung gekommen?

Der Staat steckt viel mehr Geld in Forschung und Wissenschaft als vor 1950. Damals existierte eine Art Sozialvertrag: Die öffentliche Hand sagte, wir geben der Wissenschaft Geld, lassen sie machen, da wir ohnehin nichts davon verstehen, und schauen, was sie an Positivem hervorbringt, das der Allgemeinheit dient. In den 1970er Jahren hat die Öffentlichkeit diesen Sozialvertrag aufgekündigt. Heute muss die Wissenschaft permanent belegen, was und warum sie etwas tut. Das hat zur Professionalisierung der Forschungsförderung und zur Formalisierung des Peer-Review geführt. Sie beschleunigt das Verfahren und erleichtert die Rechenschaftsablegung, weil Noten eine klare Sprache sprechen. Allerdings muss die Öffentlichkeit auch bereit sein, die steigenden Verwaltungskosten zu bezahlen. Ein Teil des Mittelzuwachses fliesst in die Kontrolle.

Bringt die Formalisierung des Peer-Review die Wissenschaften weiter?

Schwierig zu sagen. Das Peer-Review steckt in jeder Ritze des Wissenschaftssystems: Es entscheidet über Publikationen, die Forschungsförderung, die Besetzung

von Stellen und so weiter. Man kann sich gar nicht vorstellen, wie das System ohne Review funktionieren könnte. Ein Problem der Formalisierung ist, dass ihr Gegenstand, die Wissenschaft, schwer formalisierbar ist, weil sie nach Neuem strebt.

Wissenschaft müsste idealerweise herrschaftsfrei funktionieren: Durchsetzen soll sich nicht, wer am meisten Macht besitzt, sondern wer das bessere Argument einbringt. Funktioniert das Peer-Review nach diesem Prinzip?

Zum Teil. Es kann nicht jeder Beliebige Mitglied eines Gremiums werden. Gewöhnlich sitzen dort Leute ein, die sich in ihrem Feld als zentrale Figuren haben etablieren können, die einen guten Ruf und eine grosse Publikationsliste haben, kurzum: die alten Herren. Das heisst aber nicht, dass diese keine rationalen Entscheide treffen.

Neigen diese dazu, Projekte abzulehnen, die der Ausrichtung ihrer Arbeit widersprechen, und so Innovation zu verhindern?

Empirisch belegt ist der Vorwurf des Konservatismus nicht, auch wenn tatsächlich eine Reihe von Nobelpreisträgern Schwierigkeiten hatte, durch die Peer-Review-Verfahren zu kommen, weil niemand das Neue ihrer Arbeit verstanden hat. Es ist verständlich, dass arrivierte Leute nicht einfach alles über Bord werfen, was sie als richtig erachten. Das Peer-Review sorgt für die Balance zwischen Altem und Neuem, die wohl nötig ist für die Stabilität des Systems.

Viele Geisteswissenschaftler reagieren skeptisch auf die Ausbreitung des Peer-Review in ihrem Gebiet.

Man ist schnell zur Hand mit der Aussage, dass Naturwissenschaftler aufgrund ihrer Arbeitsweise kein Problem damit hätten, dass ein Gutachter auf einem Formular Noten von eins bis fünf verteile, den Durchschnitt berechne und eine Gesamtnote setze – diese Art von Objektivitätsproduktion entspreche ihrem Alltag. Und der Geisteswissenschaftler arbeite demgegenüber mit zusammenhängenden Texten, Argumenten und Ästhetik… Aber: Noch vor 15 Jahren basierten Begutachtungsverfahren in der Biologie und der Medizin nicht auf formalisierten Formularen, sondern auf frei verfassten Texten, zum Teil ist das noch heute der Fall.

Werden Texte der Komplexität eines Forschungsprojekts eher gerecht als ein Formular?

«Einige Nobelpreisträger hatten Schwierigkeiten, durch das Peer-Review zu kommen.»

Nicht unbedingt. In einer Note kann viel Wissen eines guten Gutachters stecken. Er reduziert damit die Komplexität. Aber sie reduziert die Nachvollziehbarkeit und Transparenz des Verfahrens.

Sie haben das Peer-Review des SNF im Bereich Biologie und Medizin untersucht und so Einblicke in möglicherweise brisante Dokumente erhalten. War es schwierig, eine Erlaubnis zu bekommen?

Überraschenderweise nicht. Wir haben es zuerst bei renommierten Journals versucht, sind dort aber nie weiter als in das Vorzimmer gekommen. Weil die Akten des SNF als Teil des Bundesarchivs gelten, sind sie – unter gewissen Bedingungen natürlich – zugänglich.

Vom SNF finanziert haben Sie das Peer-Review des SNF untersucht, und ich befrage Sie nun für das SNF-Forschungsmagazin über Ihre Resultate … Gehe ich recht in der Annahme, dass Sie herausgefunden haben, dass beim SNF alles in Ordnung ist?

(Lacht.) Der SNF hat nicht die kleinste Beeinflussung unternommen, er hat nicht einmal ein besonderes Interesse an unseren Resultaten bekundet. Wir konnten in Ruhe arbeiten, das war optimal. Unsere Resultate zeigen, dass die Forschungsförderung des SNF im Bereich Medizin und Biologie weder einzelne Universitäten, Sprachregionen noch die Männer oder sonst eine Gruppe bevorzugt. Dieser Teil der Ergebnisse ist für den SNF positiv. Wir haben aber auch herausgefunden, was für jedes Peer-Review gilt: Es funktioniert nicht nach rein rationalen Kriterien, sondern leistet einen Ausgleich zwischen der Produktion gesicherten Wissens und den sozialen Notwendigkeiten des Wissenschaftssystems. Es dient also dessen Selbstregulation, der Verteilung von Macht, dem Eindämmen von Konflikten. Die Doppelfunktion rührt daher, dass es ein kollaboratives Verfahren ist, an dem mehrere Gutachter beteiligt sind.

Sechs Augen sehen mehr als zwei.

Das ist der Vorteil. Der Nachteil ist die Arbeitsteilung und die zeitliche Ausdehnung. Das heisst, dass nicht zwei oder drei Gutachter die ganze Arbeit prüfen, sondern die einzelnen Reviewer verschiedene Teile. Der eine Reviewer verlässt sich auf den anderen und umgekehrt – und so verlieren sie das Ganze aus dem Blick, was bei der Beurteilung eines Gesuchs zu blinden Flecken führt.

Das Peer-Review existiert sowohl in liberalen Demokratien als auch in autoritären Systemen. Kann es überall bestehen?

Noch Ende des 20. Jahrhundert dachte die Wissenschaftssoziologie, dass sich die moderne Wissenschaft, die unabhängig von konkreten Personen funktioniert, deren Wissen offen kommuniziert und von allen geprüft werden muss, nur in der modernen Demokratie entfalten kann. Aber diese Annahme ist unrealistisch. China hat ein sehr produktives Wissenschaftssystem. Das formalisierte Peer-Review scheint so flexibel zu sein, dass man es überall einsetzen und wohl auch zu anderen Zwecken als wissenschaftlichen benutzen kann. Das ist seine Stärke wie seine Schwäche. ■

Martin Reinhart

Der Soziologe Martin Reinhart arbeitet am Programm für Wissenschaftsforschung der Universität Basel. Auf Herbst 2012 tritt er eine Juniorprofessur an der Humboldt-Universität in Berlin an. Seine Dissertation «Soziologie und Epistemologie des Peer Review. Forschungsförderung im Schweizerischen Nationalfonds» erscheint dieser Tage im Nomos-Verlag.

Peer-Review

Mit dem Peer-Review-Verfahren steuern die Wissenschaften sich selbst. Die Gutachter – allesamt Fachkolleginnen und Fachkollegen – begutachten anonym Forschungsgesuche und Papers und entscheiden über die Vergabe von Geldern und Publikationsraum.

Ruedi Widmer

Die Grenzen der Forschungsfreiheit

Alain Herzog

Die Experimente, die zur Entwicklung gefährlicher Vogelgrippeviren führten, hätten nicht stattfinden dürfen. Sie zeugen von einer Verantwortungslosigkeit in der Forschung. Nun muss die Forschungsgemeinschaft reagieren, damit beim nächsten Mal rechtzeitig die Alarmglocken läuten.

Von Didier Trono

Zwei Labors, ein europäisches und ein US-amerikanisches, haben kürzlich neue Variationen des Vogelgrippevirus H5N1 entwickelt, die von Säugetieren übertragen werden. Die Entwicklung der möglicherweise pandemischen Erreger – der laut den Beteiligten «wahrscheinlich gefährlichsten Viren, die hergestellt werden können» – hat eine wichtige Diskussion ausgelöst. Einige Forschende weisen darauf hin, dass die wissenschaftliche Unabhängigkeit unantastbar sei und dass solche Versuche nützliche Erkenntnisse liefern könnten. Die Gegner bedauern, dass die Labors wenig Weitsicht gezeigt hätten und offenbar keine Mechanismen vorhanden sind, mit denen man solche Versuche verhindern könnte. Ich teile die Ansicht, dass diese Experimente nie hätten durchgeführt werden dürfen.

Zu ihrer Rechtfertigung wird aufgeführt, dass die vorgängige Kenntnis eines gefährlichen Mutanten seine Früherkennung erlaube, dass man dadurch Impfstoffe und bessere antivirale Mittel entwickeln könne und dass sich ein solcher Mutant früher oder später auch in der Natur entwickelt hätte. Alle diese Punkte sind widerlegbar. Erstens: Es gibt keine globale Strategie zur Überwachung von Grippeviren, nicht einmal für gängige Virenstämme. Zudem ist nicht davon auszugehen, dass hochansteckende H5N1-Mutanten dieselben Sequenzen aufweisen würden wie die im Labor entwickelten Viren. Zweitens: Der Schlüssel zu einem guten Impfstoff liegt in der Identifikation von massgeblichen Antigenen des Virus und nicht in der Kenntnis seiner Virulenzfaktoren. Drittens: Breit einsetzbare antivirale Mittel zielen auf zentrale Funktionen der Viren und nicht auf stammspezifische Eigenheiten.

Viertens: Seit mehr als fünfzehn Jahren hat sich der H5N1-Virus milliardenfach in Vögeln vermehrt. Millionenfach sind dabei alle lebensfähigen Kombinationen von Mutationen entstanden. Wieso ist nie ein Mutant mit den Eigenschaften des künstlich erzeugten Virus aufgetaucht? Die gleichzeitige Einführung verschiedener Mutationen mit gentechnischen Methoden ist etwas anderes als die schrittweise Akkumulation von spontanen Mutationen, die in gewissen Kombinationen das Überleben des Virus verunmöglichen. Indem die Forschenden ein unnatürliches Umfeld schufen – nicht einmal in Aesops Fabeln sniffen Frettchen grössere Mengen von Hühnersekreten –, ermöglichten sie Entwicklungen, die unter normalen Umständen niemals stattfinden würden.

Die Befürworter führen zudem auf, dass die Ergebnisse und deren Verbreitung nicht zu einem erhöhten Risiko von Bioterrorismus beitrügen, da die Virusstämme nur in hochspezialisierten Labors herangezüchtet werden könnten. Solche Labors sind aber nicht immer sicher, wie die Anthrax-Briefanschläge zeigten, die ein Angestellter eines führenden Forschungszentrums ausgeübt hatte. Zudem ist es in der Vergangenheit zu unbeabsichtigten Freisetzungen von Viren gekommen. Und wie gross wird das Risiko in zwanzig Jahren sein, wenn die molekulare Herstellung von Viren dank einfachen Laienbausätzen und Erbgut-Synthese-Firmen trivial sein wird?

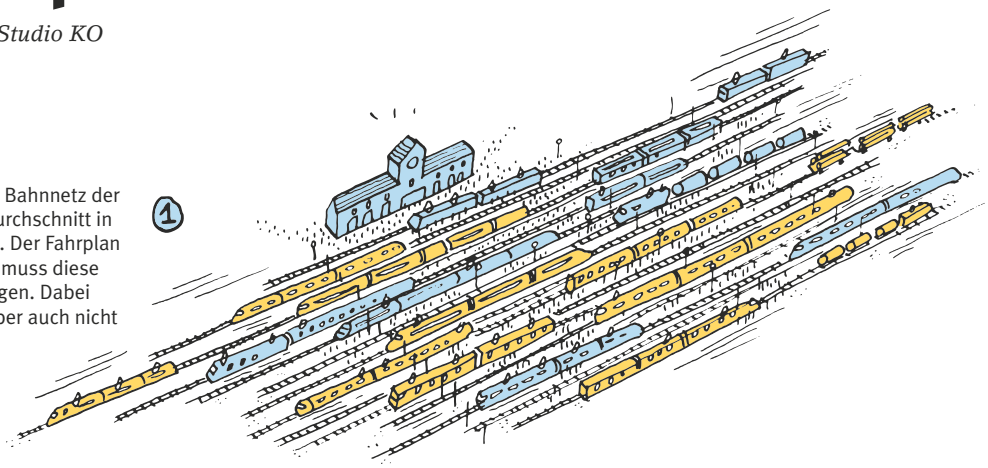
Auch wenn die neuen Virusstämme deutlich weniger tödlich sind als anfänglich angenommen, müssen nun die Forschungsgemeinschaft, die Förderorganisationen und die Aufsichtsbehörden weltweit entschlossen reagieren. Beim nächsten Vorhaben, das einen die Menschheit gefährdenden Krankheitserreger herstellen will, müssen die Alarmglocken läuten. Dass die Diskussion erst beginnt, nachdem die Beschreibungen der Erfolge zur Publikation eingereicht worden sind, zeugt von einer bedenklichen Unreife im Umgang mit dieser Art von Forschung. ■

Didier Trono ist Professor und Dekan der School of Life Sciences der ETH Lausanne. Er ist zudem Forschungsrat der Abteilung Biologie und Medizin des SNF. Er vertritt hier seine persönliche Meinung.

Das Fahren planen

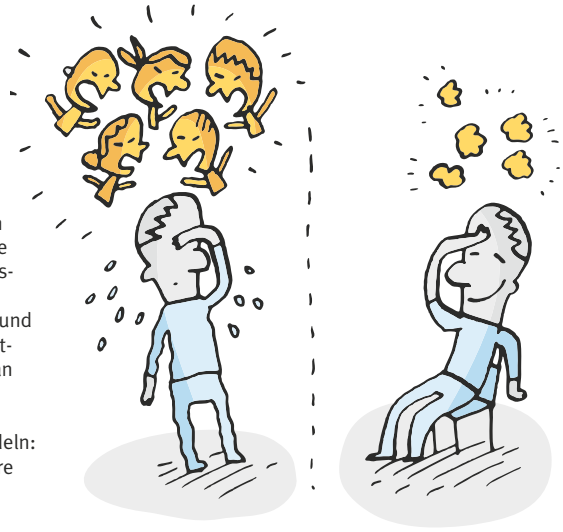
Von Simon Koechlin, Illustrationen Studio KO

Die Schweiz hat das am meisten befahrene Bahnnetz der Welt. Zwischen Olten und Aarau fährt im Durchschnitt in beide Richtungen alle drei Minuten ein Zug. Der Fahrplan der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) muss diese Fahrten reibungslos aneinander vorbeibringen. Dabei dürfen an den Bahnhöfen nicht zu lange, aber auch nicht zu kurze Umsteigezeiten entstehen.



Die Macher des Fahrplans müssen diverse Ansprüche befriedigen. Bund und Kantone stellen ihre politischen Anforderungen, die beteiligten Eisenbahnunternehmen aus dem Personen- und Güterverkehr äussern ihre wirtschaftlichen Interessen. Auch geplante Neubauten oder Unterhaltsarbeiten, die Streckensperrungen nötig machen, müssen berücksichtigt werden.

Erfahrene Planer bauen den Fahrplan auf. Priorität hat in der Regel der nationale Personenverkehr vor dem Transitgüterverkehr und dem Regionalverkehr. Der Planer nimmt Computersysteme zur Hilfe; es gibt keinen Supercomputer, der die Planung automatisch ausführt. Weil nie alle Bedürfnisse befriedigt werden können, suchen die Planer gemeinsam mit den Beteiligten nach Lösungen.



Der Planer muss während der Konstruktionsphase ein Auge darauf haben, ob der Fahrplan stabil sein wird. Für schwierige Fälle steht ihm ein Simulationsprogramm zur Verfügung. Die Simulationen sind aufwendig und benötigen viel Zeit. Eine Hauptprobe für einen neuen Fahrplan gibt es nicht. Deshalb sitzen die Fahrplaner am Tag des Fahrplanwechsels wie auf Nadeln: Erst jetzt zeigt sich, ob sich ihre Planung am Reissbrett in der Praxis bewährt.

20. Juni bis 5. August 2012

Jean Moeglé – Berner Fotopionier

Die in Zusammenarbeit mit der Burgerbibliothek Bern realisierte Ausstellung umfasst rund 120 Fotografien – zum grössten Teil Neuabzüge ab Glasplatten – des legendären Berner Porträtfotografen Jean Moeglé (1853–1938). Er fotografierte unter anderem in den Salons der Herrenhäuser am Thunersee und begleitete Touristen auf Bergwanderungen und Skitouren.
Kornhausforum Bern
www.kornhausforum.ch

Bis 31. Juli 2012

Kickstart – Coffein im Blut

Die Ausstellung thematisiert die Spannungen um die wachmachende Substanz Koffein. Sie zeigt, wie Kaffee und Tee in der westlichen Welt populär wurden, gibt einen Einblick in die Geschichte der Koffeinforschung und rückt aktuelle Phänomene wie Energy-Drink und Cellulitecreme in den Blick.
Pharmazie-Historisches Museum Basel
www.pharmaziemuseum.unibas.ch

Bis 31. Oktober 2012

Kleider in biblischer Zeit

Die Sprache der Textilien wurde auch im Altertum wahrgenommen und interpretiert. Die Ausstellung zeigt, welche Kleidertypen es in biblischer Zeit gab, aus welchen Materialien sie bestanden und welchem Zweck sie dienten.
Bibel + Orient Museum Freiburg i.Ue.
www.bible-orient-museum.ch

Bis 19. August 2012

Beresina 1812

Die Geschichte von Napoleons Russlandfeldzug 1812 und seiner Schweizer Beteiligung: Rund 500 000 Soldaten mit 200 000 Pferden, dazu Ochsen, Kanonen und Karren, sind von Königsberg bis Moskau 1300 Kilometer durch dünn besiedeltes, kaum befahrbares Gebiet unterwegs, marschieren ebenso lange zurück – und werden aufgerieben.
Historisches Museum Luzern
www.historischesmuseum.lu.ch

Bis 2. September 2012

Krankenpflege in Deutschland

Die Ausstellung «Who cares?» thematisiert die Krankenpflege in Deutschland und zeigt deren lange und verzweigte Entwicklung: Von der Pflege des 19. Jahrhunderts, der Kriegskrankenpflege und der Krankenpflege in den beiden deutschen Staaten bis hin zum stationären Alltag heute.
Medizinhistorisches Museum der Universität Zürich
www.medizin-museum.uzh.ch

Teilchenphysik zum Aufklappen

Der Large Hadron Collider – kurz LHC – des Cern in Genf ist das bislang grösste wissenschaftliche Experiment. In diesem Beschleuniger mit 27 Kilometern Umfang werden zwei gegenläufige Protonenstrahlen beinahe mit Lichtgeschwindigkeit auf Kollisionskurs geschickt, wobei ähnliche Bedingungen entstehen, wie sie in den ersten Sekundenbruchteilen nach dem Urknall geherrscht haben sollen. In «Voyage to the Heart of Matter» tauchen wir mit Anton Radevsky und Emma Sanders ab in die Tiefe des Experiments Atlas, eines 7000-Tonnen-Kolosses des LHC voller ausgeklügelter Technologie. Wo die Kollisionen stattfinden, befinden sich die Atlas-Detektoren. Sie sollen exotische Teilchen «fotografieren», die aus den energetischen Feuerwerken herausschiessen.

Mit dem ersten von vier umfassenden Bildern setzen die beiden Autoren das Experiment Atlas zuerst in den

Kontext des LHC. Im zweiten Bild begeben wir uns hundert Meter unter die Erdoberfläche in die Höhle des Löwen, der im dritten Bild seziert wird, wobei die Detektoren, aus denen Atlas besteht, Schicht für Schicht freigelegt werden. Das vierte Bild befasst sich mit der Entwicklung des Universums – vom Urknall bis heute – und mit den Antworten, die uns Atlas geben könnte. Jedes Bild wird von kurzen, leicht verständlichen Texten zu den verschiedenen Facetten von Atlas begleitet: der Komplexität der Baustelle, der Verarbeitung der ungeheuren Datenmengen, die bei der Kollision der Teilchen anfallen, oder auch der Funktion und Bestimmung der verschiedenen Detektoren.

Die Texte erlauben eine spielerische Lektüre, die von den überraschenden Aufklappbildern begleitet wird. Die Bilder verleihen dem Werk einen Retro-Touch, den man mögen kann oder nicht. Dass die Autoren die Teilchenphysik auf einige Faltkonstruktionen reduzieren, hat aber den wunderbaren Vorteil, dass sie Normalsterblichen zugänglicher wird, vorzugsweise 17- bis 77-Jährigen. **pm** ■

Anton Radevsky, Emma Sanders: Voyage to the Heart of Matter: The Atlas Experiment at Cern. Papadakis Publishers, London 2010.

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

ETHIK
Streit um Patente auf Stammzellen

AUGUST 2012

Spektrum DER WISSENSCHAFT 8/12

ASTROPHYSIK
Supernovae der Sonderklasse

FRACKING
Riskante Fördermethode für Erdgas und Öl

MEDIZIN
Epigenetische Ursachen psychiatrischer Störungen

Wunderstoff Graphen

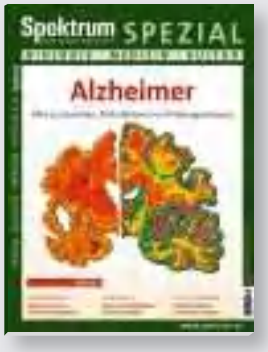
Chemiker designen Kohlenstoff-Folien für die Elektronik der Zukunft

7,90 € (D/A) · 8,50 € (L) · 14,– sFr.
D6179E

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

www.spektrum.de

Unsere Neuerscheinungen



Spektrum Spezial – Biologie · Medizin · Kultur 3/2012

ALZHEIMER

Unsere Gesellschaft wird immer älter – und damit rücken neben den demografischen Auswirkungen auch häufiger die gesundheitlichen Folgen dieses Prozesses in den Blickpunkt des öffentlichen Interesses. Eine Krankheit, die dabei ganz besonders im Vordergrund steht, ist die Alzheimerdemenz, bei der die Erkrankten einen Großteil ihres Erinnerungsvermögens verlieren. Das **Spektrum-Spezial** »Alzheimer« fasst den momentanen Wissensstand zu dieser heimtückischen Krankheit zusammen und geht der Frage nach, ob und welche Mittel es zur Prophylaxe gibt. Aus dem Inhalt:

> Fortschritte bei der Früherkennung von Alzheimer
> Risikofaktoren der Alzheimerforschung
> Lassen sich verlorene Erinnerungen zurückholen?

Das Spezial Biologie-Medizin-Kultur 3/2012 »Alzheimer« kostet € 8,90. zzgl. Versand.
Die Spezial-Reihen können auch unter www.spektrum.de/spezialabo bezogen werden.

SdW-Highlights 2/2012

KOSMISCHE URSPRÜNGE

Innerhalb weniger Generationen gelang es Wissenschaftlern, eine Chronologie des Universums zu skizzieren, die 14 Milliarden Jahre umfasst. Tief reichende Himmelsdurchmusterungen wiederum offenbaren das weitere Schicksal von Sternen und Galaxien. Zu den größten Überraschungen gehört die Entdeckung der Dunklen Energie, die nicht nur die Expansion des Alls beschleunigt, sondern womöglich auf eine neue, bislang unbekannte Physik hindeutet.

Das neue Highlights (unveränderter Nachdruck) kostet € 8,90 zzgl. Versand.
Dieses und weitere Sonderhefte finden Abonnenten von Spektrum der Wissenschaft zum Sonderpreis von € 7,40 (inkl. Inlandsversand) unter www.spektrum.de/aboplus

---

Spektrum Spezial – Physik · Mathematik · Technik 2/2012

MATHEMATHISCHE SPIELE UND STRATEGIEN

Wozu ist Mathematik eigentlich nütze? Auf diese beliebte Frage gibt das vorliegende Heft einige sehr konkrete Antworten. Die Zukunft hält häufig viele Ereignisse für einen bereit, über die man nur sehr magere Kenntnisse hat. Den todsicheren Tipp kann uns die Mathematik zwar nicht liefern, aber sie kann unsere Chancen optimieren, am Ende mit dem bestmöglichen Ergebnis dazustehen. Die hier versammelten Beiträge sind ursprünglich in der Rubrik »Mathematische Unterhaltungen« im Monatsheft von **Spektrum der Wissenschaft** erschienen.

Das Spezial »Mathematische Spiele und Strategien« kostet € 8,90 zzgl. Versand.
Die Spezial-Reihen können auch unter www.spektrum.de/spezialabo bezogen werden.

STERNE UND WELTRAUM 8/2012

Sterne und Weltraum bietet monatlich eine umfassende Weltraumperspektive für alle, die von der kosmischen Umgebung unserer Erde fasziniert sind. Experten ihres Fachs beschreiben für Sie das spannende Geschehen im Weltall. Themen der aktuellen Ausgabe sind:

>> Unser Sonnensystem: Die geologische Vielfalt der erdähnlichen Planeten
>> Hightech-Träger: Die perfekte Montageplatte für zwei Teleskope
>> Supernova 1987A, Teil 2: Ein alter Stern explodiert in jungem Gewand
>> Planetarien: Bildungseinrichtung oder Showtheater?

Sterne und Weltraum kostet € 7,90 als Einzelheft und ist auch im Abonnement (12 Ausgaben pro Jahr) für € 85,20 inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 64,–) zu beziehen.

Alle Hefte sind im Handel erhältlich oder unter:

Spektrum DER WISSENSCHAFT
WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

online: spektrum.de/lesershop
E-Mail: service@spektrum.com
Tel.: +49 6221 9126-743

Fax: +49 6221 9126-751
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg

Carsten Könneker
Chefredakteur
koenneker@spektrum.com

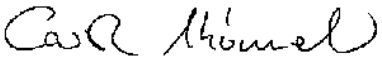
Zwischen Forschungsfreiheit und Verantwortung

Im Juni veröffentlichten die Fachzeitschriften »Nature« und »Science« zwei Artikel von Virologen aus Wisconsin beziehungsweise Rotterdam, welche die Fachwelt bereits zuvor über Monate in Atem gehalten hatten. Die Forscher hatten gentechnisch Varianten des Vogelgrippeerregers entwickelt, um zu überprüfen, ob H5N1 auch unter Säugetieren eine Pandemie auslösen könnte. Auf diese Weise wollten sie die entsprechenden Mechanismen besser verstehen. Wie die Experimente an Frettchen – den typischen Versuchstieren in der Grippeforschung – zeigten, ist das tatsächlich möglich. Nach Durchsickern der Nachricht versuchten Kritiker, die Publikation der Ergebnisse und Methoden zu verhindern. Diese könnten schließlich nicht nur Grundlagenforschern im Dienst der Grippebekämpfung, sondern auch etwaigen Bioterroristen nützen.

Natürlich wirkt die Vorstellung eines im Labor hergestellten, womöglich auch von Mensch zu Mensch übertragbaren, tödlichen H5N1-Erregers bedrohlich. Dennoch hatte die **Spektrum.de**-Redaktion bereits im Dezember 2011, kurz nach Bekanntwerden der Versuche von Yoshihiro Kawaoka und Ron Fouchier, kommentiert, dass ein Publikationsverbot nicht die erhoffte Wirkung erzielen würde, denn das neue Wissen ließe sich kaum dauerhaft in den Hochsicherheitstrakts der Virologen einsperren. Terroristen würden dadurch an nichts gehindert, »sehr wohl aber Wissenschaftler, die an Strategien gegen Krankheiten wie die Grippe arbeiten« – so das Argument von Lars Fischer (siehe spektrum.de/h5n1-kommentar). Nun wurden die Resultate also tatsächlich veröffentlicht. Die Debatte über den so genannten »Dual Use« von Studienergebnissen, nämlich zum Wohl oder Wehe, wird gleichwohl nicht abebben. Und das ist gut so! Wir müssen sie weiterführen, um Forscher an ihre Verantwortung zu erinnern. Diesen Standpunkt vertrat auch der Heidelberger Theologe und Bioethiker Klaus Tanner am 6. Juli auf einer Podiumsdiskussion der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina in Halle, die ich moderierte: »Auf Seiten der Wissenschaftler gibt es einen enormen Nachholbedarf im Hinblick auf die ethische Selbstreflexion«, so Tanner.

Keine Publikationsverbote also, sondern lediglich Sensibilisierung und Appelle? Wie steht es mit rechtlichen Regulierungen als Mittel, Fragen von Forschungsfreiheit und Verantwortung zu entscheiden – zumal wenn es um konkrete Anwendungen geht? Ebenfalls seit Herbst 2011 schwelt hier eine Debatte über ein Urteil des Europäischen Gerichtshofs. Die obersten Richter hatten am 18. Oktober Patente auf alle Verfahren mit embryonalen menschlichen Stammzellen verboten. Wir baten den Medizinethiker Ludwig Siep um eine Einordnung dieses grundlegenden Rechtsspruchs. Sie finden sie ab S. 28.

Eine gute Lektüre wünscht Ihr

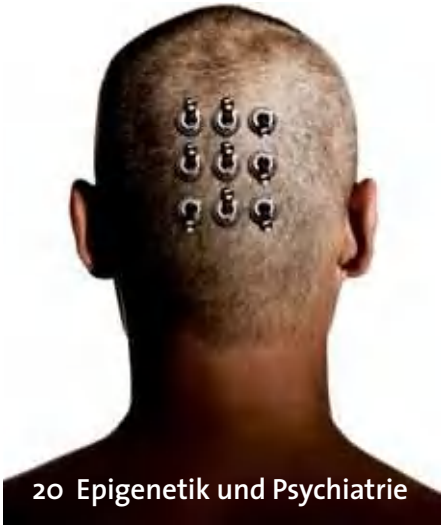


AUTOREN IN DIESEM HEFT

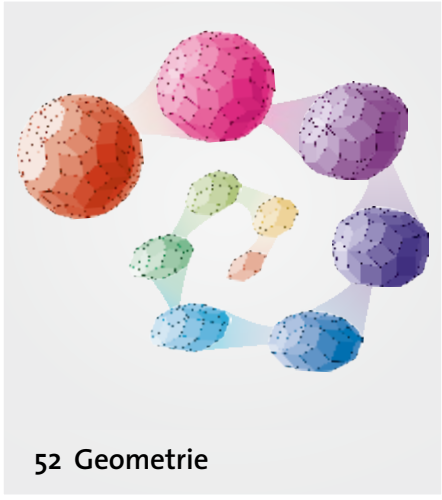
Der Wissenschaftsphilosoph **Ludwig Siep** von der Universität Münster erörtert das wegweisende Urteil des Europäischen Gerichtshofs zur Patentierung embryonaler Stammzellen (S. 28).

Der amerikanische Archäologe **James Cameron Monroe** liest aus Ruinen und den Überbleibseln von Luxusgütern, wie afrikanische Königreiche auf dem Gebiet des heutigen Benin ab dem 17. Jahrhundert durch Sklavenhandel aufblühten (S. 60).

Am Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz entwickelt der Chemiker **Klaus Müllen** erste Methoden zur synthetischen Herstellung von Graphen – jenem »Wunderstoff«, der die gesamte Elektronik und Energietechnik revolutionieren könnte (S. 82).

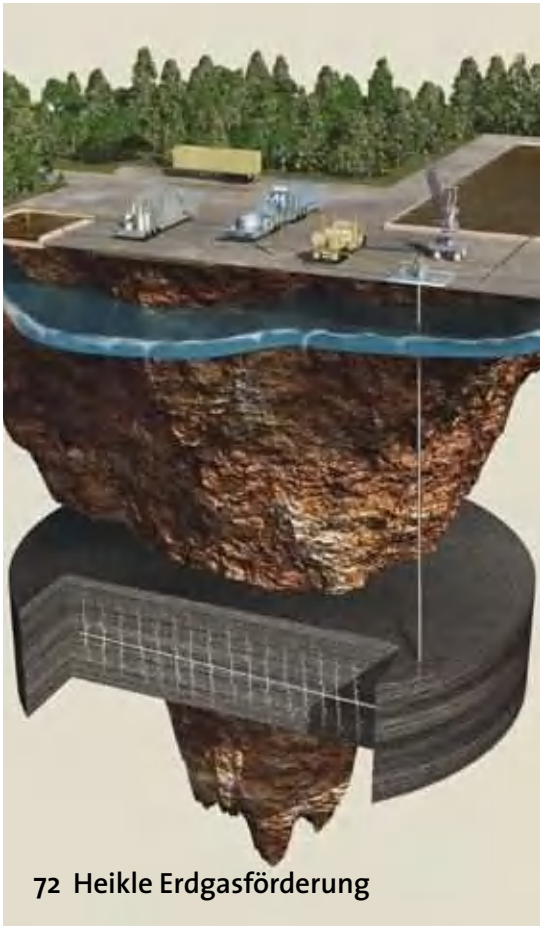


20 Epigenetik und Psychiatrie



52 Geometrie

42 Supernovae der Sonderklasse



72 Heikle Erdgasförderung

BIOLOGIE & MEDIZIN

▸ **20 Verborgene Schalter im Gehirn**
Eric J. Nestler
Drogensucht und Depression gehen mit epigenetischen Veränderungen im Denkorgan einher.

▸ **28 Patente auf Leben**
Ludwig Siep
Der Europäische Gerichtshof verbot Patente auf Verfahren mit menschlichen embryonalen Stammzellen. Auf welchen Grundlagen basiert das Urteil – und welche Auswirkungen hat es?

34 Moskitos mit Selbstmordgen
Bijal P. Trivedi
Im Kampf gegen das Denguefieber konstruieren Forscher unfruchtbare Stechmücken.

PHYSIK & ASTRONOMIE

▸ **42 Superhelle Supernovae**
Avishay Gal-Yam
Kürzlich entdeckte Sternexplosionen setzen ungeahnte Energien frei. Gigantische Himmelskörper enden nicht nur durch Kernfusion, sondern obendrein unter paarweiser Bildung von Teilchen und Antiteilchen.

SCHLICHTING!
49 Gleich und Gleich gesellt sich gern
H. Joachim Schlichting
Objekte, die auf Wasseroberflächen schwimmen, verhalten sich unerwartet. Verantwortlich dafür sind die beteiligten Grenzflächenenergien.

MENSCH & KULTUR

52 Ein Abenteuer in *n* Dimensionen
Brian Hayes
Im 100-dimensionalen Raum ist die größte Kugel, die gerade noch in eine Kiste passt, darin kaum zu finden.

60 Königreiche der Sklaverei
James Cameron Monroe
Im 16. Jahrhundert ließ der Sklavenhandel an Westafrikas Küste kleine Königtümer zu mächtigen Reichen heranwachsen.

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN
68 Magische Sechsecke
Christoph Pöppe
Die Aufgabe, Zahlen so im Sechseck anzuordnen, dass alle Reihen die gleiche Summe haben, ergibt ein neues, sudokuähnliches Spiel.

82
TITELTHEMA

Graphen aus dem Chemielabor

ERDE & UMWELT

▸ 72 **Wie riskant ist das Fracking?**
Chris Mooney
Zur Erschließung unkonventioneller Quellen von Erdgas werden Gesteinsformationen rund um das Bohrloch durch Einpressen einer Flüssigkeit aufgebrochen. Gefährdet dieses »Fracking« das Grundwasser?

Titelmotiv: Daniela Leitner

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▸ gekennzeichnet.

TECHNIK & COMPUTER

▸ TITELTHEMA
82 **Graphen aus dem Chemielabor**
Klaus Müllen
Eine nur eine Atomlage dicke Folie aus Kohlenstoff könnte die Elektronik revolutionieren. Allein – bislang fehlen geeignete Herstellungsverfahren. Doch Chemiker sind dabei, sie zu entwickeln.

90 **Vom Graphen zum Silicen**
Lars Fischer
Das Silizium-Gegenstück zum Graphen wäre für die Hochleistungselektronik vermutlich sogar noch geeigneter. Jetzt konnten Physiker den Stoff erstmals im Labor produzieren.

SPEKTROGRAMM

8 Arktis war einst wärmer • Frühe Landgänger liefen schlecht • Neues Teilchen entdeckt – das Higgs-Boson? • Alzheimerprionen • Kohärentes Röntgenlicht • Verbreitung von Wüstenpflanzen

BILD DES MONATS

11 **Augenersatz in Sicht**

FORSCHUNG AKTUELL

12 **Wie Nacktmulle das Schmerzempfinden ausschalten**
Ein seltsames afrikanisches Nagetier gibt neue Impulse zur Schmerztherapie bei Menschen.

13 **Europas lange Reise zum Jupiter**
ESA wählt Jupitermonde als Ziel ihrer nächsten großen Mission.

16 **Vererbte Mitte**
Das Zentromer der Chromosomen wird epigenetisch festgelegt – und an die Tochterzellen weitergegeben.

SPRINGERS EINWÜRFE

18 **Die Zukunft ist schon wieder überholt**
Zum Tod des letzten klassischen Sciencefiction-Autors.

WEITERE RUBRIKEN

3 Editorial

6 Leserbriefe / Impressum

67 Wissenschaft im Rückblick
Vom Schleudersitz zum Mayagrab

93 Rezensionen
Laurence C. Smith: Die Welt im Jahr 2050
Johannes Winterhagen: Abgeschaltet
Heinrich Päs: Die perfekte Welle
Jordi Quoidbach: Glückliche Menschen leben länger
Harald Fritzsch: Mikrokosmos
Alexander Hesse (Hg.): Deutschlands Supergrabungen
Alain de Botton: Religion for Atheists

98 Vorschau

FOTOLIA / PICSFIVE

Für Schokolade braucht man Kakaopflanzen. Doch die wenigen Sorten ähneln sich genetisch stark, was sie anfällig macht.

Rückkehr zur Mischkultur

Die Ernährungswissenschaftler Harold Schmitz und Howard-Yana Shapiro warnten vor Gefahren wie Klimawandel oder Pilz- und Virusinfektionen, die den empfindlichen Kakaobaum bedrohen. (»Die Zukunft der Schokolade«, Juli 2012, S. 78)

Agnes Pahler, Aichtal: Bei der Auflistung der Krankheiten, die den Kakaobaum befallen können, ist mir ein Fehler aufgefallen (S. 80 unten): Die Gattung *Phytophthora* gehört taxonomisch zu den Niederen Pilzen, ist aber eben doch ein Pilz, während im Englischen die Echten Pilze als »fungi« bezeichnet werden und somit *Phytophthora* als »fungi-like« charakterisiert wurde. Des Weiteren ist Matina 1-6 eine Sorte oder Kulturform (S. 83). Im Englischen bezeichnet »variety« eine Sorte, während die deutsche »Varietät« für eine natürlich vorkommende Abweichung steht.

Übrigens ist der Anbau von Kakao in Mischkulturen, wie ihn die Autoren auf S. 82 propagieren, keine neue Erfindung, sondern stellt die seit alters überlieferte Anbauweise dar. Inzwischen erkennt die Agrarindustrie lediglich, dass Mischkulturen den im 20. Jahrhundert eingeführten Monokulturen auf tropischen Böden überlegen sind.

Zwei Arten von Glauben

Ein friedliches Nebeneinander von rationalem Denken und Jenseitsglauben hält Michael Springer für einen frommen Wunsch. (»Denken heißt Zweifeln«, Juni 2012, S. 20)

Martin Piehslinger, Wien: Dass beides Glauben ist, kann man so sagen, aber Wissenschaft ist doch eine andere Qualität von Glauben. Mit Hilfe des Gesetzes der Schwerkraft kann ich verlässliche Voraussagen machen. Um seine Gültigkeit zumindest in meiner unmittelbaren Umgebung zu überprüfen, kann ich ein einfaches Experiment durchführen. An einem Experiment zur Überprüfung der Existenz Gottes haben sich Theologen und Kirchenlehrer jahrhundertelang die Zähne ausgebissen und es letztlich aufgegeben. Eine Voraussage, die ich auf der Existenz Gottes aufbaue, wird sich mein Leben lang nicht erfüllen; vielleicht nachher, aber das werde ich erst dann feststellen können – wenn überhaupt.

Ein wenig Statistik

Laut Douglas Fox können wir Menschen wegen physikalischer Gesetzmäßigkeiten nicht mehr viel intelligenter werden. (»Die Grenzen des Gehirns«, Mai 2012, S. 26)

Wolfgang Klein, Wehrheim: Ich sehe die Intention des Artikels darin, darzustellen, welche physiologischen Alternativen für eine Erhöhung der Leistungsfähigkeit des menschlichen Gehirns bestehen würden – unter der Voraussetzung, dass ein evolutiver Prozess existiert, der die entsprechenden Änderungen hervorruft. Das ist zwar

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.)
Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser (Monatshefte), Dr. Gerhard Trageser (Sonderhefte)
Redaktion: Thilo Körkel (Online-Koordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke, Antje Findeklee (Bild des Monats); E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Editor-at-Large: Dr. Reinhard Breuer
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Referentin des Chefredakteurs: Kirsten Baumbusch
Redaktionsassistenz: Erika Eschwei
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax -751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114
Verlagsleiter: Richard Zinken
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Gabriele Franke, Dr. Susanne Lipps-Breda, Andreas Nestke, Dr. Michael Springer.

Leser- und Bestellservice:
Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung:
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 7,90 (D/A) / € 8,50 (L) /sFr. 14,–; im Abonnement € 84,– für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Die Preise beinhalten € 8,40 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 8,40 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e.V. erhalten SdW zum Vorzugspreis.
Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Bereichsleitung Anzeigen: Marianne Dölz; Anzeigenleitung: Patrick Priesmann, Tel. 0211 887-2315, Fax 0211 887 97-2315; verantwortlich für Anzeigen: Christian Herp, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887 2481, Fax 0211 887-2686
Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 33 vom 01.01. 2012.
Gesamtherstellung: L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2012 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
75 Varick Street, New York, NY 10013-1917
Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven Inchcoombe, Vice President, Operations and Administration: Frances Newburg, Vice President, Finance, and Business Development: Michael Florek, Managing Director, Consumer Marketing: Christian Dorbandt, Vice President and Publisher: Bruce Brandfon

Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

PRESSE Fachhandel

hypothetisch, aber wissenschaftlich durchaus interessant, besonders im Vergleich mit Signalverarbeitung in der Elektronik und allgemeinen informationstheoretischen Erkenntnissen.

Reduzieren wir die herausragenden Fähigkeiten zwecks Vereinfachung auf den IQ, und nehmen wir an, dass (im Unterschied zur tatsächlichen Definition des IQ) der mittlere Intelligenzquotient nicht immer 100 ist, sondern fallen und steigen kann, so dass auch die Ab- und Zunahme der Hirnleistung der Grundgesamtheit aller lebenden Menschen im Zeitverlauf gemessen werden kann. Dann ist zu jedem Messzeitpunkt der IQ durch statistische Maße wie Mittelwert und Varianz (als Streumaß) charakterisiert.

Eine statistische Verbesserung der Hirnleistung im Mittel ohne Verbesserung der prinzipiell möglichen Hirnleistung ließe sich dadurch realisieren, dass der Mittelwert zu- (in Richtung Einstein) und die Streuung abnimmt. Allerdings schätze ich die evolutiven Chancen hierfür ebenfalls eher schlecht ein. Erforderlich wäre eine stärkere Reproduktionsrate der intelligenteren Menschen im Vergleich zu den weniger intelligenten. Das widerspricht aber der Erfahrung.

Infrarot- statt Röntgenstrahlung

Die Physiker Robert W. Boyd und Zhimin Shi stellten eine zeitlich wirksame Tarnkappe vor. (»Ein Versteck im Fluss der Zeit«, Juli 2012, S. 18)

Jörg Michael, Hannover: Auf S. 19 steht oben in der dritten Spalte eine Wellenlänge »von exakt 1,539 milliardstel Metern«. Statt 1,539 muss es wohl 1539 heißen (Röntgenstrahlung versus Infrarot).

Antwort der Redaktion:
Sie haben Recht. Eine Wellenlänge von 1,539 milliardstel Metern wäre bereits der Röntgenstrahlung zuzurechnen. Im Artikel ist aber in der Tat Infrarotstrahlung gemeint. 1539 milliardstel Meter wäre korrekt gewesen; das entspricht einer Größenordnung von millionstel Metern und damit dem infraroten Bereich. Hier ist wohl irrtümlich aus einem Tausendertrennpunkt ein Dezimalstellenkomma geworden – und damit aus Infrarot Röntgenstrahlung.

Otto Koehler beantwortete die Frage schon vor 75 Jahren

Laut einer aktuelle Studie verstehen Tauben so viel von Zahlen wie manche Affen. (»Können Tauben zählen?«, Juni 2012, S. 12)

Herbert Bibinger, Ehingen: Das Fragezeichen bei »Können Tauben zählen?« kann man seit 75 Jahren getrost weglassen. Otto Koehler hat sich in den 1930er Jahren vielfach mit dem unbenannten Zählen und Denken beschäftigt und seine Methoden und Ergebnisse auch in Filmen dokumentiert. Siehe zum Beispiel seine Arbeiten »Kann die Taube Anzahlen erfassen?« in: Verhandlungen der Deutschen Zoologischen Gesellschaft 1935, S. 39–54, und »Können Tauben zählen?« in: Zeitschrift für Tierpsychologie 1, 1937, sowie zahlreiche spätere Veröffentlichungen. Eine allgemeine Zusammenfassung findet sich in: Grzimeks Tierleben, Sonderband Verhalten, 1974, S. 320–336.

Antwort des Autors Stéphane Hess:
Vielen Dank für den Hinweis. Allem Anschein nach haben Koehler und seine Mitarbeiter in ihrer Publikation von 1937 tatsächlich einige Befunde von Damian Scarf und seinen Kollegen vorweggenommen. Koehler geht sogar noch einen Schritt weiter als Scarf: Seine Versuchstiere mussten nicht nur zwischen zwei visuellen Darstellungen mit geometrischen Formen verschiedene Anzahl unterscheiden, sondern auch die Anzahl mehrerer aufeinander folgender Ereignisse erkennen.

Während einer Lernphase wurde die Taube jedes Mal weggescheucht, wenn sie ein Korn mehr als vorher festgelegt fressen wollte. Während der anschließenden Testphase wurde geprüft, ob sie gelernt hatte, sich auf diese Anzahl Körner zu beschränken. Das gelang für bis zu sechs Körner. So hielt sie die Beschränkung auf fünf Körner in 65 Prozent aller Fälle ein und ließ in den übrigen Fällen immerhin Angst vor der zu erwartenden Bestrafung erkennen. Offensichtlich wusste die Taube, wie viele Körner sie bereits gefressen hatte.

Dieses Verhalten kommt einem Zählen näher als das von Scarf nachgewiesene Verhalten. In Koehlers Versuch war nicht eine ungefähre, sondern die genaue Anzahl von Ereignissen entscheidend. Nach wie vor bleibt die Frage bestehen, was im Kopf der Taube vorgeht und ob man das bereits als »Zählen« bezeichnen kann. Koehler formuliert denn auch sehr vorsichtig. Er behauptet nicht, Tauben könnten bis sechs zählen, sondern »auf sechs handeln«.

FOLGEN SIE UNS IM INTERNET

facebook
www.spektrum.de/facebook

YouTube
www.spektrum.de/youtube

studiVZ
www.spektrum.de/studivz

twitter
www.spektrum.de/twitter

BRIEFE AN DIE REDAKTION

... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf www.spektrum.de/leserbriefe oder schreiben Sie mit Ihrer kompletten Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Leserbriefe
Sigrid Spies
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

Die vollständigen Leserbriefe und Antworten der Autoren finden Sie ebenfalls unter: www.spektrum.de/leserbriefe

KLIMAFORSCHUNG

Arktis war einst viel wärmer

In den zurückliegenden 2,8 Millionen Jahren gab es wiederholt Phasen, in denen die Arktis deutlich wärmer war als heute – etwa vor rund 0,4 und 1,1 Millionen Jahren. Das belegen Messungen an einem Sedimentbohrkern aus dem See Elgygytgyn. Der See liegt in einem 3,6 Millionen Jahre alten Meteoriteneinschlagkrater, etwa 100 Kilometer nördlich des Polarkreises auf dem sibirischen Festland.

Wissenschaftler um Martin Melles von der Universität zu Köln untersuchten die oberen 135 Meter des Bohrkerns. Sie stießen auf mehrere feinkörnige, rötlich braune Ablagerungen, in denen die Verhältnisse verschiedener Isotope und der hohe Gehalt an organischem Kohlenstoff auf besonders warme Zeiten hindeuten. Damals blühte im Frühjahr und Sommer reiches Leben im See, während eine Eisdecke im Winter den Abbau der niedergesunkenen Biomasse bremste.

Melles und seine Kollegen berechneten, dass die Sommertemperaturen zu diesen Zeiten wohl um fünf bis sieben Grad Celsius höher lagen als heute. Zudem fielen jährlich etwa 350 Millimeter mehr Niederschlag. Zeitgleich zu solchen extrem warmen arktischen Perioden herrschte auch am Südpol Tauwetter, das den westantarktischen Eisschelf schrumpfen ließ und das Rossmeer teilweise vom Eis befreite. Offenbar sei das Klimageschehen in den beiden Polregionen eng miteinander verknüpft, schreiben die Forscher. Der genaue Mechanismus dahinter sei aber noch nicht geklärt.

Science 10.1126/science.1222135, 2012

PAVEL S. MINYUK, NORTH-EAST INTERDISCIPLINARY SCIENCE RESEARCH INSTITUTE, RUSSLAND

Der zugefrorene See Elgygytgyn in der sibirischen Arktis: Tief unter diesem Eis liegen Sedimente, die sich als Klimaarchiv der vergangenen drei Millionen Jahre nutzen lassen.

PALÄONTOLOGIE

Frühes Landtier kam nur mühsam voran

Ichthyostega gilt als eines der ersten Wirbeltiere, die zeitweilig an Land leben konnten. Bisher nahmen viele Paläontologen an, dass diese amphibienartigen Wesen sich ähnlich wie heutige Salamander bewegten, indem sie auf vier stämmigen Beinen einherschritten. Stephanie Pierce von der University of Cambridge und ihre Kollegen bezweifeln das: Die urzeitlichen Tiere waren laut ihren Erkenntnissen gar nicht in der Lage zu laufen – sie stemmten sich vielmehr wie auf Krücken vorwärts.

Die Forscher hatten zahlreiche *Ichthyostega*-Fossilien mittels Computertomografie untersucht. Daraus erstellten sie ein dreidimensionales Computermodell des Skeletts der Tiere, an dem sie die Beweglichkeit einzelner Gliedmaßen testeten. Zum Vergleich zogen sie entsprechende Daten von heutigen Tieren wie Salamandern, Krokodilen oder Robben heran.

Demnach besaß *Ichthyostega* sehr starre Hüft- und Schultergelenke, die ein »normales« Gehen verhinderten. So konnten die Tiere ihre Gliedmaßen zwar beugen und strecken, heranziehen und abspreizen, aber kaum um die Längsachse drehen. Zudem waren ihre Füße wie Paddel ausgerichtet, was es unmöglich machte, die Sohlen auf den Boden zu setzen (siehe Bild).

Wahrscheinlich bewegte sich *Ichthyostega* ähnlich wie heutige Schlammspringer. Diese amphibisch lebenden Fische besiedeln etwa Mangrovenwälder an Meeresküsten. Um an Land weiterzukommen, stemmen sie sich mit beiden Vorderflossen gleichzeitig hoch und machen einen kleinen Hüpfer nach vorn – ungefähr wie ein Mensch, der auf Krücken humpelt. Auch *Ichthyostega* benutzte seine Vorderläufe wohl synchron, um sich ruckartig vorwärtszuhieven.

Nature 486, S. 523–526, 2012

ILLUSTRATION: JULIA MOLNAR

***Ichthyostega* – hier eine Rekonstruktion – war nicht gerade ein flinker Läufer.**

PHYSIK

Neues Teilchen entdeckt – ist es das Higgs-Boson?

Am 4. Juli haben zwei Teams am Teilchenbeschleuniger LHC des Forschungszentrums CERN bei Genf verkündet, ein neues Partikel entdeckt zu haben. Einen »Meilenstein in unserem Verständnis der Natur« nannte CERN-Generaldirektor Rolf Heuer den Fund. Es könnte sich um das Higgs-Boson handeln, das Forscher in Edinburgh, Brüssel und London schon 1964 postuliert hatten. Falls dem so ist, würde die Entdeckung das Standardmodell der Teilchenphysik komplettieren. Die Masse des neuen Teilchens beträgt zwischen 125 und 126 Gigaelektronvolt, liegt also in einem der von Theoretikern vorhergesagten Bereiche. Zum Redaktionsschluss galten die Ergebnisse noch als vorläufig, Ende Juli sollten sie publikationsreif sein.

Um zu bestätigen, dass sie tatsächlich auf das lang ersehnte Higgs gestoßen sind, benötigen die Forscher allerdings zusätzliche Daten. Denn viele Eigenschaften ihres Funds sind noch ungeklärt. Beträgt sein Spin 0, wie die Theorie sagt? Sind die CERN-Wissenschaftler gar einer noch größeren Sensation auf der Spur, vielleicht einem so genannten supersymmetrischen Boson? Dies würde auf eine neuartige Symmetrie in der Natur und auf viele bislang unbekannte Partikel hindeuten.

Der eigentliche Nachweis des neuen Teilchens, das beim Zusammenprall von energiereichen Protonen entsteht, erfolgte am LHC auf indirektem Weg. Denn das Higgs-Boson zerfällt bereits nach kürzester Zeit wieder, zum Beispiel in Paare von Photonen oder von Z- oder W-Bosonen. Nur diese können die Forscher tatsächlich erfassen. Genau hier ist in den nächsten Monaten weitere Arbeit zu leisten, denn bislang wurden nicht alle der vielen möglichen Zerfallswege experimentell hinreichend untersucht. Die fünf noch lebenden der sechs »Erfinder« des Higgs-Bosons, darunter der britische Physiker und Namensgeber des Teilchens, Peter Higgs, gelten aber schon jetzt als heiße Kandidaten für den Nobelpreis.

MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de

Weitere aktuelle Informationen zum Higgs-Boson finden Sie unter
www.spektrum.de/teilchenphysik

MEDIZIN

Alzheimer ist möglicherweise eine Prionenkrankheit

An der Alzheimerkrankheit könnten infektiöse Partikel beteiligt sein, meinen Forscher um Jan Stöhr von der University of California in San Francisco. Ihren Erkenntnissen zufolge verhalten sich die Beta-Amyloid-Moleküle, die im Gehirn von Alzheimerpatienten verklumpen, wie Prionen. Bei diesen Proteinen kann sich die Aminosäurekette entweder zu einer normalen oder zu einer krank machenden Form falten. Letztere überträgt sich auf intakte Moleküle der gleichen Eiweißsorte, wodurch Krankheiten wie BSE entstehen.

Die Forscher spritzten Mäusen größere Mengen von fehlgefaltetem Beta-Amyloid, das sie aus den Hirnen genetisch veränderter Nager gewonnen oder synthetisch hergestellt hatten. Mit einem speziellen bildgebenden Verfahren zeigten sie, dass die Behandlung zu einer deutlich stärkeren Ablagerung von Beta-Amyloid im Gehirn der Tiere führte. Obwohl die Injektion nur in eine Hirnhälfte erfolgt war, trat der Effekt in beiden Hälften auf. Das spricht nach Ansicht der Wissenschaftler für einen stetig fortschreitenden Prozess, wie er bei Prioneninfektionen – etwa der Creutzfeldt-Jakob-Krankheit – abläuft. Einige Hinweise legen nahe, dass auch die Parkinsonkrankheit und die amyotrophe Lateralsklerose auf infektiöse Proteine zurückgehen.

Eine Ansteckung von Mensch zu Mensch durch Alzheimerprionen ist jedoch sehr unwahrscheinlich, betonen die Forscher: Die pathogenen Eiweißstoffe müssten dazu in großer Menge ins Gehirn gelangen. Allerdings warnen sie vor Impfversuchen mit (normalem) Beta-Amyloid. Solche Injektionen hatten früher bei Mäusen zu verminderter Plaquebildung im Gehirn und besseren kognitiven Leistungen geführt und waren auch an Patienten mit deren Einverständnis vorgenommen worden. Da bei einigen aber Nebenwirkungen auftraten, wurden die Versuche wieder abgebrochen.

PNAS 109, S. 11025–11030, 2012

LASERPHYSIK

Kohärente Röntgenblitze vom Labortisch

Forscher um Tenio Popmintchev von der University of Colorado in Boulder haben einen gepulsten Infrarot-Laserstrahl in kurzwellige Lichtblitze umgewandelt, deren Spektrum sich bis in den Röntgenbereich erstreckt. Sie bestehen aus Wellen unterschiedlicher Frequenzen, die aber jeweils im Gleichtakt schwingen, also kohärent sind. Damit eigneten sie sich hervorragend für spektroskopische Untersuchungen in der Materialforschung, schreiben die Autoren.

Das Team schickte infrarote Laserpulse in einen Hohlwellenleiter, der mit Helium gefüllt war. Dort ionisierte das elektrische Feld des Laserpulses die Gasatome und beschleunigte die freigesetzten Elektronen. Sobald das Feld sein Vorzeichen änderte, kehrten die Elektronen zu den Atomen zurück. Ihre kinetische Energie gaben sie dabei in Form von Photonen ab, deren Frequenzen um ein Vielfaches höher lagen als die des Infrarotlasers. Den Forschern gelang es, Photonen bis zu einer Energie von 1,6 Kiloelektronvolt zu produzieren, was weicher Röntgenstrahlung entspricht.

Bei geeigneten Randbedingungen – eingestrahlte Wellenlänge, Heliumdruck und Geometrie des Wellenleiters – sind die erzeugten Lichtwellen kohärent wie in einem Laserstrahl. Dennoch decken sie ein breites Spektrum vom UV- bis zum Röntgenbereich ab. Eine solche Summe aus kohärenten Wellen sehr unterschiedlicher Frequenzen nennt man ein Superkontinuum.

Die neue Lichtquelle passt auf einen großen Labortisch und ist damit wesentlich kleiner als Röntgenlaser auf der Basis von Teilchenbeschleunigern, wie sie weltweit im Einsatz sind. Allerdings erreicht sie nicht so hohe Photonenenergien wie diese. Als Nächstes wollen die Forscher um Popmintchev das Spektrum ihrer Lichtquelle bis in den harten Röntgenbereich ausdehnen.

Science 336, S. 1287–1291, 2012

TENIO POPMINTCHEV, JILA, UNIVERSITY OF COLORADO AT BOULDER

Aufbau des Experiments: Ein gepulster Infrarotlaser feuert Photonen in einen Hohlwellenleiter, der mit komprimiertem Heliumgas gefüllt ist. In dem Hohlwellenleiter wird ein Teil der Laserstrahlung in kohärente Röntgenblitze umgewandelt.

MEHR WISSEN BEI **Spektrum.de**

Aktuelle Spektrogramme finden Sie täglich unter

www.**spektrum.de**/spektrogramm

BIOLOGIE

Scharfe Verbreitungsstrategie

Viele Pflanzen verstecken ihre Samen in süß schmeckenden Früchten. Tiere verspeisen diese und scheiden das Saatgut andernorts wieder aus, wo es keimen kann. Die Wüstenpflanze *Ochradenus baccatus* verbreitet sich zwar ebenfalls mit Hilfe von Tieren, erspart ihren Samen dabei aber die potenziell gefährliche Passage durch den Verdauungstrakt: Eine chemische Reaktion sorgt dafür, dass Samen und Fruchtfleisch zusammen ungenießbar werden.

Michal Samuni-Blank vom Technion-Israel Institute of Technology und ihre Kollegen untersuchten mit Kameras das Verhalten verschiedener Mäusearten, die sich in den Wüsten Israels von *Ochradenus-baccatus*-Früchten ernähren. Dabei beobachteten sie wiederholt, wie die Nager ihre Beute zu einem sicheren, oft schattigen Ort schleppten. Dort fraßen die Tiere das Fruchtfleisch, spuckten den Samen jedoch aus.

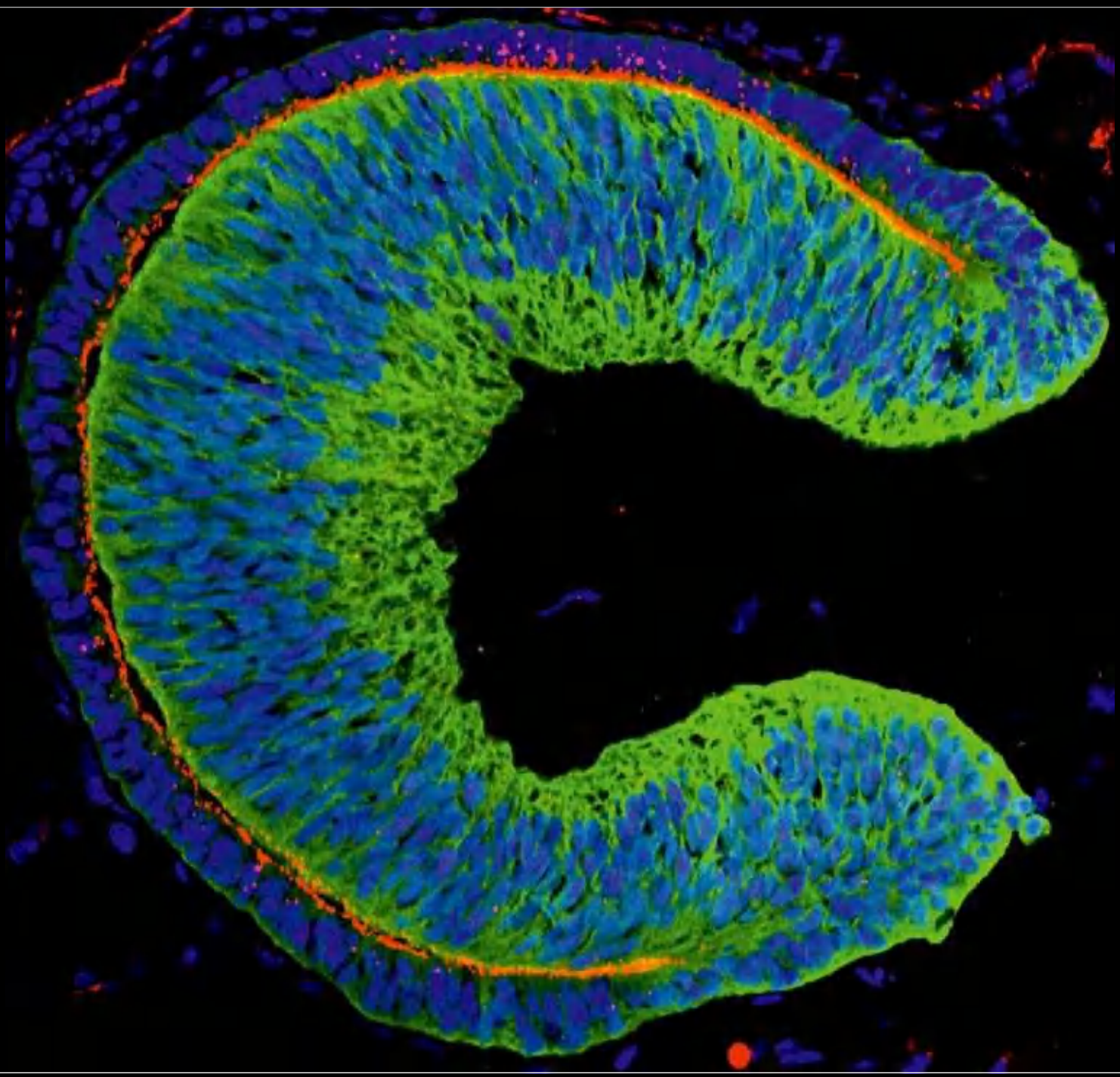
Der Grund dafür ist ein Zusammenspiel verschiedener Moleküle. Beim Anknabbern der Samen reagiert das darin enthaltene Enzym Myrosinase mit bestimmten Pflanzenstoffen, so genannten Glucosinolaten, aus dem Fruchtfleisch. Hierbei entstehen unangenehm scharf schmeckende Stoffe. Um das zu vermeiden, speien die Tiere das Saatgut aus, statt es anzunagen. An dem schattigen Platz kann es dann gut keimen.

Curr. Biol. 10.1016/j.cub.2012.04.051

MEHR WISSEN BEI **Spektrum.de**

Video zum Thema mit der leitenden Forscherin Michal Samuni-Blank

www.**spektrum.de**/verbreitungsstrategie



NAKANO, T. ET AL.: SELF-FORMATION OF OPTIC CUPS AND STORABLE STRATIFIED NEURAL RETINA FROM HUMAN ESCS. IN: CELL STEM CELL 10, S. 771–785, 2012

AUGENERSATZ IN SICHT

Embryonale Stammzellen entwickeln sich in der Petrischale von allein zu einem Augenbecher inklusive Lichtsinneszellen. Vor einem Jahr hatten die Forscher diesen Erfolg bereits bei Mäusestammzellen erzielt (siehe SdW 7/2011, S. 16). Jetzt gelang ihnen das Kunststück auch bei menschlichen Zellen. Außerdem schafften sie es, das Gewebe einzufrieren, ohne dass es seine Funktion einbüßte (hellgrün: neurale Netzhaut; dunkelgrün: Pigmentepithel; blau: Zellkerne; rot: aktives Myosin).

Cell Stem Cell 10, S. 771–785, 2012

WAHRNEHMUNG

Wie Nacktmulle das Schmerzempfinden ausschalten

Ein seltsames afrikanisches Nagetier gibt neue Impulse für die Schmerztherapie bei Menschen.

VON RUSS HODGE

Der afrikanische Nacktmull *(Heterocephalus glaber)* ist ungewöhnlich – in mehrfacher Hinsicht: Er besitzt als einziges wechselwarmes Säugetier kein Haarkleid und wird mitunter weit über 20 Jahre alt, lebt also bis zu zehnmal so lang wie andere Nager. Zudem verbringen Nacktmulle die meiste Zeit zusammengedrängt in ausgedehnten unterirdischen Kolonien (SdW 10/1992, S. 90). In diesem System aus Gängen und kleinen Höhlen sind sie einer hohen Konzentration an Kohlendioxid ausgesetzt, was das Gewebe stark sauer macht. Für andere Tiere wäre das unerträglich schmerzhaft – der Nacktmull hingegen hat eine einzigartige Unempfindlichkeit dagegen entwickelt. Gary Lewin und seine Mitarbeiter am Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin (MDC) in Berlin untersuchen die rund 15 Zentimeter langen Nager schon seit Jahren, um den zu Grunde liegenden Mechanismus zu entschlüsseln – und damit auch mehr über das menschliche Schmerzempfinden zu lernen.

Nun haben die Forscher kürzlich ein Molekül identifiziert, das eine zentrale Rolle bei dem Phänomen spielt *(Science 334, S. 1557–1560, 2011)*. In ihren Untersuchungen hatten sie sich auf Ionenkanäle konzentriert: Proteine, die den Durchtritt von elektrisch geladenen Atomen durch Zellmembranen ermöglichen. Solch ein Ionenstrom kann unter anderem so genannte Aktionspotenziale auslösen, mit denen Nervenzellen Signale weiterleiten. Das geschieht auch bei der Schmerzwahrnehmung. Dabei erzeugt die Stimulation eines Nozizeptors – eines Neurons, das auf Schmerzreize reagiert – einen elektrischen Impuls, der daraufhin über das Rückenmark ins Gehirn gelangt.

FOTO RECHTS: MDC / CHRISTIAN SCHROTH; FOTO OBEN: MDC / PETRA DAHL

Der Schmerzforscher Gary Lewin mit einem afrikanischen Nacktmull *(Heterocephalus glaber)* im Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin (MDC) Berlin-Buch.

Hier spielt nun der Säuregehalt des Gewebes hinein, denn Säuren zeichnen sich durch eine hohe Konzentration von Protonen (Wasserstoffionen) aus. Diese öffnen oder schließen bestimmte Typen von Ionenkanälen. Bislang hielten Forscher das für den Auslöser von säurebedingtem Schmerz und vermuteten den Grund für die Unempfindlichkeit des Nacktmulls im Fehlen eines solchen Kanals. Die neue Studie zeigt aber, dass die Tiere doch Ionenkanäle besitzen, die bei Aktivierung durch Protonen Schmerzrezeptoren erregen. Allerdings haben sie daneben auch noch einen zweiten Kanaltyp, $Na_v1.7$ genannt, der ebenfalls ansprechen muss, damit die Zelle Schmerzinformationen weitergibt. Und der verhält sich bei Nacktmullen anders als bei anderen Tieren.

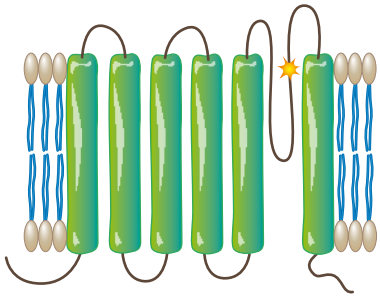
Damit ein Aktionspotenzial – und darüber Schmerzempfinden – entsteht, muss sich der $Na_v1.7$-Kanal öffnen und Natriumionen durch die Membran hindurchlassen. Die in Säuren enthaltenen Protonen wirken dem jedoch entgegen: Der Kanal bleibt eher zu. Bei Menschen, Mäusen und anderen Tieren ist dieser schmerzdämpfende Effekt allerdings nur schwach und wird von der Wirkung anderer säureempfindlicher Ionenkanäle überdeckt. Bei Nacktmullen hingegen verschließen Protonen den $Na_v1.7$-Kanal fest. Das hindert den Nozizeptor am »Feuern«, und selbst beachtliche Säuremengen lösen keine Schmerzempfindung aus.

Diese Entdeckung erklärt auch einige bislang rätselhafte Beobachtungen zur Schmerzempfindlichkeit bei Menschen. Die menschliche Version von $Na_v1.7$ nennt sich SCN9A. Über den ganzen Globus verstreut gibt es einzelne

Familien mit Mutationen des entsprechenden Gens. Handelt es sich bei dem Kanal um eine Version, die besonders leicht erregt wird, entwickeln die Betroffenen oft chronische Schmerzen.

Andere Mutationen von SCN9A haben den gegenteiligen Effekt und führen zu einem ungewöhnlichen Syndrom namens »Channelopathy-associated Insensitivity to Pain« (CIP; zu Deutsch etwa: mit Kanalstörungen gekoppelte Schmerzunempfindlichkeit). Im Jahr 2010 haben Forschungsgruppen der University of Cambridge und der Ben Gurion University of the Negev in Israel drei Beduinenmädchen mit solchen Mutationen untersucht. Alle hatten Narben von Verbrennungen, Spuren von Knochenbrüchen, oder ihnen fehlten Zehen, die während ihrer Kindheit abgetrennt worden waren. Selbst solche traumatischen Verletzungen hatten den Mädchen nicht wehgetan, und die Wunden waren infolgedessen oft unbehandelt geblieben. Auch muss man Kindern mit der Krankheit häufig erst beibringen, nicht die eigenen Finger- oder Zungenspitzen abzubeißen. Ein pakistanischer Mann, in dessen Familie CIP verbreitet ist, wurde bekannt, weil er aus seiner Mutation Profit schlagen konnte: Als Straßenkünstler unterhielt er seine Zuschauer, indem er über heiße Kohlen lief oder sich selbst mit einer Klinge stach.

Lewins Erkenntnisse liefern Hinweise darauf, wie solche Mutationen die Schmerzwahrnehmung verändern können. Offenbar spielt $Na_v1.7$ dabei eine zentrale Rolle, was neue Wege für die Schmerztherapie eröffnet. So erleben Patienten, die unter chronischen Schmerzen leiden, diese stärker, wenn ihr Gewebe säurehaltiger wird – zum Beispiel bei Arthritis. Ein Wirkstoff, der die menschliche Variante von $Na_v1.7$ so fest wie beim Nacktmull verschließt, könnte die Schmerzwahrnehmung deutlich dämpfen. Eine solche Substanz wäre demnach ein hervorragender Ausgangspunkt für neue Medikamente.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK

In der schematischen Darstellung der vierten Domäne des Ionenkanalproteins $Na_v1.7$ markiert der gelbe Stern jene Stelle in der Aminosäurekette, an der negative Ladungen dafür sorgen, dass (positive) Protonen den Kanal fest verschließen können.

Russ Hodge ist Wissenschaftsjournalist am Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin in Berlin-Buch.

WELTRAUMMISSIONEN

Europas lange Reise zum Jupiter

Ihre nächste große Weltraummission widmet die ESA den Jupitermonden, allen voran dem geologisch interessanten Ganymed. Zwei weitere Projektvorschläge gingen hingegen leer aus. »Spektrum« erläutert die Hintergründe der umstrittenen Entscheidung.

THORSTEN DAMBECK

Im Fokus der nächsten großen europäischen Wissenschaftsmission steht das Jupitersystem, so gab die europäische Weltraumbehörde ESA Anfang Mai bekannt. Damit erhielt die Planetenmission »Jupiter Icy Moons Explorer« (Juice) den Vorzug vor zwei anderen Projektvorschlägen, nämlich dem Weltraumobservatorium für Gravitationswellen NGO (»New Gravitational wave Observatory«) und dem satellitenbasierten Teleskop für Hochenergie-Astrophysik Athena (»Advanced Telescope for High-Energy Astrophysics«).

2004 hatte die ESA Weltraumwissenschaftler aufgerufen, Projekte vorzuschlagen. Drei Jahre später wurden Juice, NGO und Athena vorausgewählt. Allerdings kann die Behörde aus Budgetgründen nur eine einzige Mission in Angriff nehmen.

Geht alles nach Plan, wird die Juice-Sonde 2022 vom Raketenbahnhof Kourou in Französisch-Guayana starten und 2030 den Jupiter erreichen. Ihre lange Reisezeit erklärt sich unter anderem dadurch, dass die Startrakete Ariane-5 eher für Transfers in Erdorbits geeignet ist. Einmal angekommen, soll sie den Gasriesen und seine Trabanten, die selbst schon so groß sind wie kleine Gesteinsplaneten, mindestens drei Jahre lang detailliert beobachten. 2032 schwenkt sie schließlich in eine Umlaufbahn um den Mond Ganymed ein, das wichtigste Ziel der Reise.

Juice ist die erste große Wissenschaftsmission im Rahmen des »Cosmic Vision«-Programms, in dem die ESA ihre Pläne bis zum Jahr 2025 festgeschrieben hat. Neben kleineren und mittleren sieht sie darin auch »L-Missionen« vor. Für diese schwergewichtigen Vorhaben – L steht für »large« – veranschlagt die ESA jeweils rund 870 Millionen Euro aus ihrem eigenen Etat, hinzu kommen zusätzliche 240 bis 270 Millionen Euro von ihren Mitglied-

NASA / ESA / UNIVERSITY OF ARIZONA, ERICH KARKOSCHKA

Im Verlauf der nun beschlossenen ESA-Mission Juice soll eine Raumsonde 2030 den Jupiter erreichen und 2032 in eine Umlaufbahn um Ganymed (rechts unten) einschwenken, den mit rund 5300 Kilometer Durchmesser größten Mond des Sonnensystems.

staaten. So viel Geld nur für eine Reise zu einem Gasplaneten?

»Jupiter ist der Archetyp der Riesenplaneten unseres Sonnensystems und vieler Riesenplaneten anderer Sterne«, kommentiert der ESA-Direktor für Wissenschaft und robotische Exploration Alvaro Giménez Cañete die Entscheidung. Die nach ihrem Entdecker benannten Galileischen Monde des Jupiters – Io, Europa, Ganymed und Kallisto – bilden eine Art Sonnensystem en miniature, da sie aus einer Staubscheibe um ihren Planeten entstanden sind. Wissenschaftler versprechen sich von ihrer Erkundung deshalb Aufschluss über die ähnlich ablaufenden Bildungsprozesse von Planeten um ihre Sonnen.

Auch astrobiologisch sind die Trabanten interessant, denn Europa, Ganymed und Kallisto dürften große Wasservorkommen unter ihren vereisten Oberflächen beherbergen. Juice-Forscher hoffen erstmals zu messen, wie tief Europas vermuteter Ozean unterhalb der rissigen Kruste liegt. Zudem suchen sie nach möglichen Landeplätzen, von denen aus künftige Robotermissionen die Oberfläche Europas erkunden sollen. Der Nachbarmond Ganymed – der einzige im Sonnensystem, der nachgewiesenermaßen ein eigenes globales Magnetfeld besitzt – hat vor allem Geologen viel zu bieten. Seine Oberfläche ist teils sehr alt, teils jung; Letzteres spricht für großflächige geologische Transformationsprozesse. Kallisto schließlich, den Juice mindestens einmal anfliegen soll, gehört zu den kraterreichsten Objekten im Sonnensystem, besitzt also die ursprünglichste Oberfläche.

»Jupiter ist **der Archetyp der Riesenplaneten unseres Sonnensystems** und vieler Riesenplaneten anderer Sterne«

Die Enscheidung für Juice sei »angesichts der hervorragenden Qualität der drei Missionen« nicht leichtgefallen, erklärt Richard Bonneville, der Vorsitzende des mächtigen Science Programme Committee (SPC), das in letzter Instanz die wissenschaftlichen Programme der ESA auswählt. Zudem verkomplizierte auch die NASA die Entscheidungsfindung. Ursprünglich saßen die Amerikaner in allen drei L-Klasse-Projekten als Partner mit im Boot. Im März 2011 zogen sie sich aus finanziellen Gründen jedoch plötzlich zurück, womit eine wichtige Säule der Finanzierung wegbrach. Die ESA räumte den Projektteams daraufhin ein Jahr Fristverlängerung ein – zur Überarbeitung, sprich Verkleinerung, der Vorhaben.

»Durch den Ausstieg der Amerikaner wurden die stärker verflochtenen Missionsvorschläge wohl härter getroffen«, vermutet Tilman Spohn, Direktor des Instituts für Planetenforschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt. Das Jupiterprojekt war hingegen von Anfang an ein zweigeteiltes Vorhaben. Ein Teil – die US-geführte Sonde, die den Mond Europa umkreisen sollte – ließ sich ohne große Umstände streichen. Ersatzweise wird Juice nun um zwei Europa-Vorbeiflüge ergänzt. Zudem scheint es Chancen für eine Beteiligung Russlands zu geben. Schon seit einigen Jahren wird dort eine Landemission im Jupitersystem vorbereitet; nun fassen die Forscher Ganymed ins Auge.

Das an astronomischen Fragen ausgerichtete Röntgenprojekt Athena und das auf fundamentalphysikalische Fragen zielende Gravitationswellen-Observatorium NGO hatten größere Probleme, sich der neuen Situation anzupassen. Der Bericht des Space Science Advisory Committee (SSAC), das die ESA berät und dem einige Dutzend hochkarätiger Wissenschaftler angehören, listet zudem erhebliche technische Risiken beider Projekte auf. Außerdem werde es bei den anvisierten Startterminen absehbar zu Verschiebungen kommen.

Athena hätte mit Hilfe zweier neuartiger Röntgenteleskope Orte besonders energiereicher Strahlung aufspüren sollen. Auf diese Weise lassen sich unter anderem die extremen Bedingungen rund um supermassereiche Schwarze Löcher untersuchen. Auch die Entwicklungsphasen von Superno-

vae und Neutronensternen wollten die Forscher während der Mission in den Blick nehmen. Zudem hätten sie Ansammlungen heißen Gases kartiert. So ließe sich Aufschluss darüber gewinnen, wie sich großräumige Strukturen im Universum bilden. NGO wiederum hätte sich auf die Spur einer Art kosmischen Hintergrundrauschens gemacht. Es erreicht uns, so sagen es Theoretiker voraus, in Form von Gravitationswellen, die unter anderem von verschmelzenden Schwarzen Löchern aus fast allen kosmischen Epochen ausgehen.

Ein verzweifelter Versuch, das Ruder noch herumzureißen

Nun also hatte das Jupiterprojekt das Rennen gemacht. Das Votum des SSAC blieb allerdings erst einmal geheim. Als das Gremium Anfang April mit knapper Mehrheit Juice empfohlen hatte, veröffentlichte die ESA weder das Resultat noch die entscheidenden Gründe. Für Transparenz sorgte erst der Wissenschaftsblogger Steinn Sigurðsson. Als die britische BBC dessen Informationen aufgriff, verschaffte sie nicht nur dem Spruch des SSAC eine breite Öffentlichkeit, sondern auch einigen Details aus dem internen Bericht. Das Athena-Team mit seinem Sprecher Kirpal Nandra vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching erfuhr davon und versuchte, das Ruder herumzureißen; schließlich stand die endgültige Entscheidung durch das SPC zu diesem Zeitpunkt noch aus.

Für ihre Petition sammelten die Röntgenastronomen im Internet über 1500 Unterstützer aus der Fachwelt, darunter rund 250 Wissenschaftler allein aus Deutschland. Ein beeindruckender Beleg für den wissenschaftlichen Stellenwert des Projekts, meint Astrophysiker Nandra. In ihrem Brandbrief befürchten die Unterzeichner, dass der Röntgenastronomie eine folgenreiche Zäsur drohe, falls altgediente Satelliten wie XMM Newton und Chandra den Betrieb einstellen müssten, ohne dass Ersatz geschaffen sei. Ein Argument mit Schwächen, denn zumindest der dauerhafte Weiterbetrieb des europäischen XMM-Teleskops sei technisch durchaus vorstellbar, sagen Experten – möglicherweise bis weit in die 2020er Jahre hinein.

Überrascht, aber naturgemäß zufrieden zeigte man sich im Camp der Planetologen. Die Entscheidung sei »ein Glücksfall und eine wichtige Unterstützung für unsere Forschung«, so Tilman Spohn. Der Berliner Planetengeologe, der dem SSAC-Gremium bis 2010 selbst sechs Jahre lang angehört hatte, räumt aber ein, dass die unterlegenen wissenschaftlichen Communitys nun ein Problem hätten. »Der ESA ist das bewusst, und sie ist um Balance bemüht«, sagt Spohn. So wäre bei künftigen Auswahlrunden ein Ausgleich für die diesmal nicht zum Zuge gekommenen Disziplinen denkbar.

Die Gravitationsforscher hoffen unterdessen auf Schadensbegrenzung. Wir müssen »die hochmotivierte Wissenschafts-Community zusammenhalten«, so Karsten Danzmann vom Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Hannover. Schließlich sieht man sich kurz vor dem Ziel. Bereits seit 20 Jahren versuchen Forscher, Gravitationswellen vom Weltraum oder vom Boden aus nachzuweisen. Trotz großer Steigerungen der Messempfindlichkeit blieb der Erfolg zwar bisher aus. Mit einer neuen Detektorgeneration auf der Erde soll sich das ab 2015 aber schlagartig ändern (siehe »Mit Pulsaren auf der Jagd nach Gravitationswellen«, SdW 7/2011, S. 48).

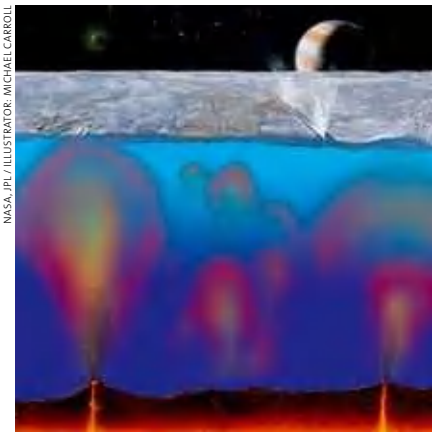
Das NGO brächte den endgültigen Durchbruch. Es ginge dabei nämlich um viel mehr als einen weiteren Test der allgemeinen Relativitätstheorie, auch wenn es Albert Einstein war, der die Gravitationswellen vor knapp einem Jahrhundert postuliert hatte. Tatsächlich sollen die drei Satelliten, die zusammen ein Laser-Interferometer mit einer Armlänge von einer Million Kilometer bilden, ein bislang verschlossenes Fenster zum Kosmos aufstoßen: Im »Licht« von Gravitationswellen lassen sich kollidierende Schwarze Löcher, die Abläufe im Innern von Supernovae oder der innere Aufbau von Neutronensternen untersuchen.

NASA, JPL / DLR / GALILEO PROJECT

Ganymed zeichnet sich durch aktive Tektonik aus. Die Einzelaufnahmen des Mosaiks, aufgenommen 1999 von der NASA-Sonde Galileo, sind kontrastverstärkt.

NASA, JPL

Die detaillierteste Aufnahme des Monds Europa, hier ein Ausschnitt mit 1,8 Kilometer Breite, gelang der Raumsonde Galileo 1997 aus 560 Kilometer Entfernung. Die Oberfläche der kilometerdicken Kruste aus Wassereis ist durch helle Bergrücken und dunkle Täler strukturiert. Darunter verbirgt sich ein tiefer Wasserozean.



NASA, JPL / ILLUSTRATOR: MICHAEL CARROLL

Wie sieht es in Europas Innerem aus? Ein gängiges Szenario lautet: Hitze, möglicherweise vulkanischen Ursprungs, steigt aus dem Gesteinsmantel empor und wird durch Wasserströmungen nach oben transportiert. Dort sorgt sie in der extrem kalten Eiskruste für Verwerfungen, die sogar aus dem All sichtbar sind.

Doch NGO und Athena sind nur aufgeschoben. »In den kommenden Jahren«, sagt Danzmann, »werden wir die technischen Lücken schließen und uns auf den Start von Lisa Pathfinder konzentrieren.« Diese ESA-Sonde soll wichtige Techniken für das NGO erproben und nachweisen, dass sich die angestrebte Messgenauigkeit erreichen lässt. Zwei Testkörper sollen innerhalb der Sonde frei schweben, ihre Position muss dabei bis auf einige Pikometer, also billionstel Meter, genau gemessen werden. Die Mission ist bereits beschlossen, das zuletzt verlautbarte Budget beläuft sich auf 305 Millionen Euro. Wegen technischer Probleme wurde sie jedoch schon mehrfach verschoben, aktueller Starttermin ist 2014. Trotz des Dämpfers für das Vorhaben bleibt Danzmann auch weiterhin optimistisch: Denn wenn Lisa Pathfinder ein Erfolg werde, seien alle Risikoargumente vom Tisch. Und schon ab 2015 befindet die ESA über die nächste L-Mission, deren Start 2028 stattfinden könnte. Dann allerdings befindet sich Juice schon im Anflug auf Jupiter.

Thorsten Dambeck ist promovierter Physiker und arbeitet als Wissenschaftsautor in Heidelberg.

EPIGENETIK

Vererbte Mitte

Ein einziges Protein bestimmt bei Taufliegen über die exakte Position des so genannten Zentromers: des für die Zellteilung entscheidenden Mittelteils von Chromosomen. Nicht nur das – es gibt diese Information auch an die Tochterzellen weiter.

VON EMMANUELLE VANIET

Unmittelbar vor der Zellteilung liegt die Erbinformation in Form dicht gepackter, X-förmiger Bündel aus DNA und Proteinen vor: den »kondensierten« Chromosomen. Deren taillenartige Einschnürung nennt sich Zentromer – der Begriff stammt aus dem Griechischen und bedeutet Mittelteil. An diesem Ort spaltet sich das Chromosom in zwei Chromatiden, die jeweils die vollständige Erbinformation enthalten. Diese werden dann auf die beiden neu gebildeten Zellen verteilt.

Das Zentromer allein reicht dafür allerdings nicht aus: Es stellt lediglich die Andockstelle des so genannten Kinetochors dar – eines riesigen Proteinkomplexes. An ihn heftet sich das Zellskelett beidseitig des Chromosoms an und zieht die zwei Chromatiden auseinander. Fehlt jedoch das Zentromer oder erfüllt es seine Rolle nicht ordnungsgemäß, entstehen Zellen, bei denen ganze Chromosomen fehlen oder aber doppelt vorkommen. In Keimzellen kann das zu genetischen Defekten des Nachwuchses führen, in den anderen Körperzellen zu Krebs.

Bis jetzt war rätselhaft, was die Position des Zentromers auf den Chromosomen festlegt. Zwar gibt es im Erbgut der Bäckerhefe *Saccharomyces cerevisiae*, eines beliebten Untersuchungsobjekts der Genetiker, einen 125 Basen langen DNA-Abschnitt, der den Trennungspunkt markiert. Doch bei anderen Organismen – inklusive dem Menschen – fand sich keine solche eindeutige Sequenz. Die Abfolge der Erbgutbausteine sagt also nicht voraus, wo das Zentromer sein wird, und gibt diese Information damit auch nicht an die Tochterzellen weiter. Forscher um Patrick Heun vom Max-Planck-Institut für Immunbiologie und Epigenetik in Freiburg haben nun den entscheidenden Mechanismus entdeckt: Offensichtlich ist ein Protein namens CENH3 ganz allein in der Lage, die Position des Zentromers zu markieren. Darüber hinaus sorgt es auch dafür, dass diese Stelle nach einer Zellteilung beibehalten wird. Es handelt sich dabei um einen so genannten epigenetischen Prozess.

Dass nicht nur die Gene allein, sondern auch andere Faktoren das Schicksal einer Zelle bestimmen, ist nicht neu. Obwohl alle Zellen eines Embryos dasselbe Erbgut enthalten, differenzieren sie sich im Lauf der Entwicklung des Organismus in höchst unterschiedliche Typen aus. Zu Grunde liegen epigenetische Mechanismen, bei denen nicht die

genetische Information an sich – also die DNA-Sequenz – entscheidet, sondern das Maß, wie dicht der Erbgutfaden im Zellkern verpackt ist. Das kann die Aktivität der Gene und somit das Verhalten der Zelle auf dramatische Weise beeinflussen (siehe SdW 7/2011, S. 28 und den Artikel ab S. 20 im vorliegenden Heft).

Unter anderem regulieren die so genannten Histone die Packungsdichte: Diese Proteine bilden Komplexe, um die sich die DNA wie um eine Spule wickelt. Im Bereich des Zentromers findet man eine Histonvariante, die sonst nirgends vorkommt: CENH3 ersetzt dort den sonst üblichen Typ H3. Könnte also CENH3 die Position des Zentromers festlegen?

Patrick Heun und seine Mitarbeiter schleusten das Histon in Zellen der Taufliege *Drosophila melanogaster* ein und lenkten es gezielt an einen Ort des Chromosoms 3, der ein Stück entfernt von dem des natürlichen Zentromers liegt *(Science 334, S. 686–690, 2011)*. Hierfür nutzten sie Elemente des so genannten lac-Operon-Systems aus dem Bakterium *Escherichia coli (E. coli)*: Ein Repressorprotein verhindert dort das Ablesen von Genen, indem es sich an eine bestimmte Stelle der DNA vor diesen – genannt lacO – bindet.

Bauanleitung für ein Zentromer

Heun und seine Kollegen verknüpften den Lac-Repressor von *E. coli* mit CENH3 und verfrachteten das Ganze in die *Drosophila*-Zellen. In deren Chromosom 3 hatten sie zuvor lacO-Sequenzen abseits des natürlichen Zentromers eingebaut. Dank des angehängten Repressors sammelte sich das modifizierte CENH3 an dieser Stelle an. Und siehe da: Einen Tag später erschien dort der Kinetochor-Komplex, das Zellskelett dockte an – ein neues funktionstüchtiges Zentromer war entstanden.

Darüber hinaus war CENH3 offensichtlich nicht nur in der Lage, den zellulären Trennungsapparat herbeizuholen, sondern zusätzlich noch weitere, zelleigene CENH3-Moleküle, die dann dort an die DNA binden und in das Chromosom integriert werden. Laut Heun zeigt dies, dass das Histonmolekül nicht nur das Zentromer markiert, sondern auch dessen Position vererben kann. So wird der Ort des Zentromers von Generation zu Generation epigenetisch weitergegeben.

Doch fiel es den Forschern bislang schwer, die *Drosophila*-Zellen mit dem neuen Zentromer über längere Zeit zu beobachten und damit diese Art der Vererbung des Mittelstücks zweifelsfrei zu beweisen. Denn sobald sich zwei Zentromere auf einem Chromosom befinden, zerrt das Zellskelett bei der Teilung nicht mehr nur an einer Stelle, sondern an zwei. Dadurch zerbricht das Chromosom, was ein »Selbstmordprogramm« der Zelle auslöst – ein eingebauter Schutzmechanismus vor späteren Folgeschäden wie die erwähnten Tumoren.

www.spektrum.de/aboplus

Der Premiumbereich – exklusiv für Abonnenten von **Spektrum der Wissenschaft**

SDW ABOPLUS

Jahresabonnenten von **Spektrum der Wissenschaft** profitieren nicht nur von besonders günstigen Abokonditionen, exklusiv auf sie warten unter www.spektrum.de/aboplus auch eine ganze Reihe weiterer hochwertiger Inhalte und Angebote, unter anderem:

- Alle **Spektrum der Wissenschaft**-Artikel seit 1993 im Volltext
- Ein Mitgliedsausweis, dessen Inhaber in zahlreichen Museen und wissenschaftlichen Einrichtungen ermäßigten Eintritt erhält
- Vergünstigte Sonderhefte, kostenlose Downloads und das Produkt des Monats zum Spezialpreis
- Ein Preisnachlass beim Bezug von Spektrum.de-Premium, mit unserer wöchentlichen Digitalzeitung »Die Woche«

Produkt des Monats

Spektrum DER WISSENSCHAFT Wissenschaft aus erster Hand

www.spektrum.de/aboplus

Die Zukunft ist schon wieder überholt

Zum Tod des letzten klassischen Sciencefiction-Autors

Bis in die 1950er Jahre war Sciencefiction Schund. Auf dem typischen Groschenheft prangte ein Rieseninsekt, das eine spärlich bekleidete Blondine in den Fängen hielt. Erst mit Isaac Asimov (»Ich, der Robot«) und Arthur C. Clarke (»2001«) kamen Geschichten auf, die man nicht mehr unter der Schulbank verstecken musste. Ray Bradbury, der nun hochbetagt gestorben ist, erklomm mit »Fahrenheit 451« sogar die Höhen der schönen Literatur, wie der Astronom und Sciencefiction-Autor David Brin in einem Nachruf auf den Vorläufer neidlos anerkennt *(Nature 486, S. 471, 2012)*.

Wer François Truffauts Verfilmung von 1966 gesehen hat, wird die Schlussszene nicht vergessen: Menschen spazieren im Schnee als lebende Hörbücher; sie memorieren die Romane der Weltliteratur, weil Bücher verboten sind. Denn wer liest, kommt auf eigene Gedanken, und das ist in dieser Zukunftswelt so unerwünscht, dass die Feuerwehr die Aufgabe hat, Bücher zu verbrennen.

Bradbury erfand unheimlich einprägsame Bilder. Die Kurzgeschichte »Der lange Regen« fällt mir immer ein, wenn mich ein heftiger Schauer überrascht. Nie habe ich das Gefühl, der Nässe ausgeliefert zu sein, plastischer beschrieben gefunden als in der Schilderung jener Raumfahrer, die auf der Venus durch permanenten Regen irren und sterben müssen, wenn sie nicht bald die rettende Kuppel erreichen.

Noch ein unvergessliches Bild: Ein vollautomatisches Haus erwacht und beginnt sein Tagewerk. Erst mit der Zeit dämmert dem Leser, dass die Erde menschenleer und von den Bewohnern nur ein Schatten an der Hausmauer übrig ist – Zitat eines realen Pressefotos aus Hiroshima nach dem Bombenabwurf.

Diese Zukunftsgeschichte (»Sanfte Regen werden kommen«) stammt wie die vorige von 1950; beide wurzeln in einer längst vergangenen Vorstellungswelt. Die klassische Sciencefiction entwarf das Schreckensbild der Erde nach einem Atomkrieg, und unsere Nachbarplaneten ähnelten unserem eigenen. Die Venus war eine jüngere Erde, tropisch und urtümlich. Auf dem Mars ging dagegen gerade eine uralte Zivilisation zu Grunde, die den Roten Planeten mit einem Netz von Kanälen überzogen hatte.

Seit die sowjetischen Venera-Raketen die Venus erkundet haben, wissen wir, dass es dort schon deshalb niemals regnen kann, weil es mit über 450 Grad Celsius dafür viel zu heiß ist. Und auf dem Mars haben – je nach Verlauf der ausgemalten Begegnung leider oder zum Glück – nie intelligente Wesen existiert; die Kanäle waren optische Täuschungen. Falls es im Sonnensystem außerirdische Spuren von Leben gibt, dann am ehesten auf dem Jupitermond Europa, dessen innerer Ozean nicht komplett gefroren ist (siehe S. 13). An seinem Grund gibt es womöglich heiße Quellen, in deren Nähe exotische Mikroorganismen hausen könnten, die ohne Sonnenlicht auskommen – ähnlich wie bei den hydrothermalen Schloten in der irdischen Tiefsee.

Auch im Innern des Saturnmonds Titan verbirgt sich ein hunderte Kilometer tiefes Wassermeer, was Messungen mit der Raumsonde Cassini gerade erst wieder bestätigt haben *(Science 336, S. 1629, 2012)*. Allerdings dürfte es eiskalt und wenig lebensfreundlich sein. Dennoch ist Titan aus einem anderen Grund schon länger ein Spielplatz für Spekulationen um extraterrestrisches Leben: Aus seiner methanreichen Stickstoffatmosphäre fällt ein dichter Regen organischer Moleküle.

So darf man sich auf einem dieser sonnenfernen Monde mit viel Fantasie Biomoleküle, exotische Einzeller, vielleicht sogar hier und da dünnen Schimmelbelag ausmalen. Das ist verglichen mit Ray Bradburys Venus-Tropen und Mars-Altertümern freilich ein recht kümmerliches Bild. Aber so geht's: Je mehr Science, desto weniger Fiktion.

Michael Springer

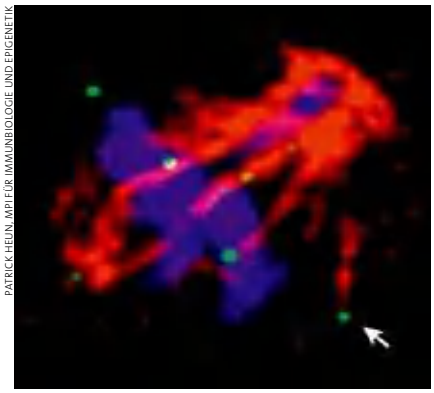
Der Durchbruch erfolgte im Rahmen einer Zusammenarbeit mit dem Helmholtz Zentrum in München: Die Forscher produzierten nun das neue Zentromer nicht mehr auf einem Chromosom der Fliege, sondern auf einem künstlichen Minichromosom, das sie vorher in die Zellen eingebracht hatten.

Solche künstlichen Chromosomen sind nicht nur Experimentierwerkzeuge, sie werden auch als zukünftige Gentransporter für die Gentherapie angesehen. Bis jetzt verwenden Wissenschaftler meist veränderte Viren, um Gene in kranke Zellen einzuführen. Künstliche Chromosomen dagegen ermöglichen es, größere Mengen genetischen Materials einzuschleusen. Im Gegensatz zu vielen Viren integrieren sie sich auch nicht ins Genom der behandelten Zellen – was potenzielle Probleme vermeidet.

Verlängerte Lebensdauer für Minichromosomen

Lange erwies es sich allerdings als schwierig, künstliche Chromosomen mit einem Zentromer zu versehen. Die DNA-Moleküle wurden im Zuge der Zellteilung zwar kopiert, jedoch nicht gleichmäßig auf die Nachkommenzellen verteilt. Folglich verschwanden sie im Lauf der Zeit allmählich. So erging es auch Minichromosomen von Heun, die kein Zentromer trugen: Nach drei Wochen ließen sie sich in den *Drosophila*-Zellen nicht mehr nachweisen. Waren sie jedoch mit lacO-Sequenzen ausgestattet, hielten sie sich immerhin doppelt so lange. Sie hatten CENH3 gebunden und funktionsfähige Zentromere gebildet (siehe Bild oben rechts).

Doch so stabil wie natürliche Chromosomen sind die künstlichen Minichromosomen mit Zentromer noch lange nicht. Nach einer gewissen Zeit verschwinden auch sie wieder – warum, das versuchen die Forscher nun herauszufinden. Zudem ist es alles andere als gewiss, ob sich die Ergebnisse in menschlichen Zellen reproduzieren lassen. Bei diesen sind die Mechanismen grundsätzlich viel komplexer: »Während der innere Teil des Kine-



PATRICK HEUN, MPI FÜR IMMUNBIOLOGIE UND EPIGENETIK

Fluoreszenzmikroskopische Aufnahme einer Taufliegenzelle. Die Forscher statteten künstliche Minichromosomen (grün) mit lacO-Ködersequenzen für das CENH3-Histon aus und brachten sie in die Fliegenzellen ein. Daraufhin bildeten sich auf den Minichromosomen offensichtlich funktionstüchtige Zentromere, an die das Zellskelett während der Zellteilung ebenso anhaften kann (Pfeil) wie an die natürlichen Zentromere (blau).

tochors bei *Drosophila* aus zwei Proteinen besteht, sind es beim Menschen gleich 15.« Ob auch dort CENH3 allein im Stande ist, ein Zentromer zu bilden, bleibt zu klären. Dazu kommt, dass es in der Zelle effiziente Mechanismen gibt, die verlagertes CENH3 entfernen können. Laut Heun sollen sie gerade vor der Bildung riskanter »multizentrischer« Chromosomen und den damit verbundenen Chromosomenbrüchen schützen.

Allerdings: Zusätzliche Zentromere bringen nicht immer Nachteile mit sich. Sie seien sogar während der Evolution am Auftreten neuer Spezies beteiligt gewesen, meinen die Forscher. So entstand mit der Abspaltung der Menschenaffen (genauer: Menschenartigen) von der Stammeslinie der Meerkatzenverwandten vor einigen Millionen Jahren bei Letzteren ein neues Zentromer (9q33.1). Umgekehrt können Zentromere auch verschwinden: Durch Fusion zweier Chromosomen des heutigen Schimpansen entstand das menschliche Chromosom 2 – dabei ging ein Zentromer verloren.

Solche dynamischen Entwicklungen sind nur mittels epigenetischer Markierung möglich, so Heun: »Es ist einfacher, eine epigenetische Markierung zu entfernen, als eine lange DNA-Sequenz durch Mutationen zu verändern.« Wo ein genetisch fixierter Ort des Zentromers chromosomale Veränderungen nicht zugelassen hätte, erlaubten die flexibleren epigenetischen Mechanismen eine schnelle Anpassung – zum Beispiel die Entfernung des überzähligen Zentromers aus der Schimpansenlinie – und dadurch den Erhalt der betroffenen Zellen. Laut Heun könnte also die epigenetische Markierung des Zentromers durchaus als Antriebskraft bei der Evolution gewirkt haben.

Emmanuelle Vaniet ist promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Darmstadt.

WISSEN, WAS WICHTIG IST –
IMMER UND ÜBERALL!

Mit dem Digitalabo von **Spektrum der Wissenschaft**

Jahresabonnenten (Privatnutzer) können nicht nur die aktuelle Ausgabe direkt als PDF abrufen, sondern haben auch noch vollen Zugriff auf das komplette Onlineheftarchiv!

www.spektrum.de/digitalabo

Spezielle Enzyme regeln die Aktivität des Erbguts im Gehirn – quasi wie Schalter im Kopf.

PLAMEN PETKOV

NEUROWISSENSCHAFTEN

Verborgene Schalter im Gehirn

Erlebnisse und Erfahrungen lösen epigenetische Veränderungen im Gehirn aus und beeinflussen dadurch die Aktivität von Genen. Das kann Verhaltensänderungen bis hin zu psychiatrischen Störungen hervorrufen.

Von Eric J. Nestler

Matt und Greg sind Zwillingsbrüder. Sie wuchsen in der Nähe von Boston auf und waren beide gute Schüler. In ihrem sozialen Umfeld kamen sie stets gut zurecht. Als Jugendliche tranken sie ab und zu ein Bier, rauchten hin und wieder eine Zigarette und experimentierten gelegentlich mit Marihuana, wie das viele junge Leute tun. Auf der Universität jedoch probierten sie Kokain, und diese Erfahrung prägte beide auf ganz unterschiedliche Weise. Während Matt es beim Versuch beließ – er arbeitet heute als Geschichtslehrer –, wurde sein Bruder von der Droge abhängig und völlig aus der Bahn geworfen.

Zunächst führte Greg sein Leben noch relativ normal weiter, studierte und hielt den Kontakt zu Freunden. Doch dann verfiel er dem Kokain immer mehr. Er verließ die Universität und nahm diverse Aushilfsjobs an, etwa im Einzelhandel oder in Schnellrestaurants. Keinen Arbeitsplatz behielt er länger als ein oder zwei Monate. Meist wurde er entlassen, weil er zu häufig fehlte oder mit Kunden oder Kollegen in Streit geriet. Greg verhielt sich mit der Zeit immer unberechenbarer und neigte zunehmend zu Gewaltausbrüchen. Wiederholt wurde er inhaftiert, weil er stahl, um seinen Drogenkonsum zu finanzieren. Mehrere Entzugstherapien scheiterten, und als ein Gericht ihn mit 33 Jahren zur Untersuchung in eine psychiatrische Klinik einwies, war er bettelarm und obdachlos, von der Familie verstoßen und ein Gefangener seiner Sucht.

Wieso war Greg so empfänglich für das Kokain, dass es sein Leben zerstören konnte? Weshalb entging sein Zwillingsbruder, der exakt die gleichen Gene besitzt, einem ähnlichen Schicksal? Warum führt die Einnahme von Drogen bei manchen Menschen zu lebenslanger Sucht, während andere ihre Jugendsünden hinter sich lassen?

Diese Fragen sind nicht neu, doch erst jetzt scheinen Neurowissenschaftler den Antworten auf die Spur zu kommen. In den zurückliegenden Jahren haben Biologen zahlreiche molekulare Mechanismen entdeckt, die zu einem stärkeren oder schwächeren Ablesen von Genen führen, ohne dass die dort gespeicherte Information verändert wird. Dabei markieren Enzyme bestimmte Abschnitte der DNA und beeinflussen so deren Aktivität, manchmal sogar lebenslang. Weil dieser Eingriff nicht die Nukleotidsequenz des DNA-Strangs betrifft, sondern sich »oberhalb« von ihr abspielt, spricht man von epigenetischen Modifikationen (von griechisch: epi = über).

Viele Wissenschaftler, darunter meine Arbeitsgruppe, haben Hinweise darauf gefunden, dass epigenetische Modifikationen eine wichtige Rolle bei Drogensucht, Depression und anderen psychiatrischen Erkrankungen spielen. Sie beeinflussen, wie das individuelle Gehirn auf Drogen oder chronischen Stress reagiert, und machen manche Menschen besonders anfällig gegenüber solchen Einflüssen. Zwar stehen wir in der Erforschung des folgenreichen Wechselspiels von Genen und Umwelt noch ganz am Anfang, doch hoffen wir, dass unsere Erkentnisse zu besseren Therapien gegen psychiatrische Erkrankungen beitragen werden. Vielleicht hilft uns die Epigenetik sogar zu verstehen, wie solche Störungen von einer Generation an die nächste weitergegeben werden.

Obwohl Wissenschaftler die genetischen Ursachen von Sucht, Depression, Autismus, Schizophrenie und anderen psychiatrischen Erkrankungen seit Jahrzehnten erforschen, bestehen hier immer noch große Wissenslücken. Sicher

AUF EINEN BLICK

WEICHENSTELLUNG IN DER ZELLE

1 Erlebnisse und Erfahrungen können zu psychiatrischen Erkrankungen beitragen, indem sie das **Erbgut von Hirnzellen** epigenetisch verändern. Das beeinflusst die Aktivität bestimmter Gene. Deren **Nukleotidsequenz** bleibt allerdings unverändert.

2 Tierstudien zeigen, dass Suchterkrankungen, Depressionen sowie bestimmte **Verhaltensmuster** mit **epigenetischen Modifikationen von Hirnzellen** einhergehen. Noch ist nicht abschließend geklärt, ob diese Veränderungen erblich sein können.

3 Wissenschaftler hoffen, dass die Epigenetik den Weg zu besseren Therapien von **psychiatrischen Erkrankungen** weist.

scheint, dass diese neurologischen Störungen eine starke erbliche Komponente haben: Etwa die Hälfte des Risikos, dass sich eine Sucht oder Depression manifestiert, ist genetisch bedingt – das ist höher als der erbliche Anteil von Bluthochdruck und den meisten Krebsarten. Doch die Gene entscheiden nicht allein. Wie das Beispiel der Zwillinge Greg und Matt zeigt, garantiert eine identische Genausstattung nicht, dass sich bei zwei Personen die gleiche Krankheit ausprägt. Stattdessen werden psychiatrische Erkrankungen bei genetisch vorbelasteten Individuen durch Umwelteinflüsse ausgelöst – etwa Drogenkonsum oder Stress – oder manchmal sogar durch zufällig stattfindende molekulare Vorgänge während der Individualentwicklung. Und nie wachsen zwei Menschen unter exakt identischen Bedingungen auf oder machen dieselben Erfahrungen.

Rauschwirkung des Kokains beruht auf verändertem »Spielplan« in Hirnzellen

Die Frage lautet also, über welche Mechanismen diese äußeren Einflüsse zu psychiatrischen Erkrankungen führen. In einer Hinsicht ist die Antwort klar: Die entscheidende Schaltstelle sitzt im Gehirn. Seine Neurone verarbeiten alles, was wir erleben, etwa einen Kinobesuch, eine Umarmung, das Schnupfen von Kokain oder ein gutes Abendessen. Sie geben die gewonnenen Informationen untereinander weiter, indem sie biochemische Botenstoffe austauschen. Diese Neurotransmitter aktivieren oder hemmen einzelne Nervenzellen und schalten bestimmte Gene an oder aus. Das Spektrum von Erbfaktoren, das ein bestimmter Neurotransmitter beeinflusst, entscheidet mit darüber, wie die betroffenen Neurone auf einen äußeren Stimulus reagieren und wie sich der jeweilige Mensch letztlich verhält.

Viele dieser Effekte halten nur kurze Zeit an. So aktiviert die Einnahme von Kokain das Belohnungszentrum im Gehirn und erzeugt ein vorübergehendes Gefühl der Euphorie. Es verblasst jedoch rasch, worauf das System in den Ausgangszustand zurückkehrt. Weit gehend ungeklärt ist, wie Drogen, Stress oder andere Erfahrungen anhaltende Langzeiteffekte hervorrufen können, so dass ein Mensch eine Depression entwickelt oder drogensüchtig wird. Viele Neurowissenschaftler sind der Auffassung, dass hier die Epigenetik ins Spiel kommt.

Vereinfacht ausgedrückt ist ein Gen ein Stück DNA, das typischerweise die Bauanleitung für ein Protein enthält. Proteine führen die meisten Funktionen der Zelle aus und bestimmen daher ihr Verhalten. Die DNA befindet sich im Zellkern, wo sie wie ein langer Faden aufgewickelt ist – auf Klumpen aus so genannten Histonproteinen. Dabei windet sich der DNA-Strang um einen Komplex aus acht Histonen, läuft weiter zum nächsten Histonkomplex, windet sich auch um diesen und so fort (siehe Kasten rechts). So entsteht eine perlschnurähnliche Struktur aus DNA und Proteinen, die sich ihrerseits – unter Anlagerung weiterer Proteine – zu einem dichten Knäuel zusammenfaltet, dem Chromatin. Es ist das Material, aus dem die Chromosomen bestehen.

Diese komplizierte Faltung dient einerseits dazu, das riesige DNA-Molekül – beim Menschen ist es insgesamt etwa zwei Meter lang – in den winzigen Zellkern zu packen. Sie trägt aber auch dazu bei, die Aktivität der Gene zu regulieren. In den dichter gepackten Bereichen des Chromatins sind die Gene eher inaktiv, da die molekulare Maschinerie, die die Gene abliest, hier einen erschwerten Zugang hat (siehe SdW 7/2011, S. 28). Falls die Zelle auf ein Gen zugreifen muss, lockert sich das Chromatin dort auf, wodurch die molekulare Maschinerie die entsprechende DNA-Sequenz ablesen und in RNA umschreiben kann. In den meisten Fällen dient der so erstellte RNA-Strang als Bauanleitung für ein Protein. Über diesen Mechanismus liest etwa eine angeregte Nervenzelle verstärkt Gene ab, die für Neurotransmitter kodieren, und stellt mehr von den Botenstoffen her.

Ob nun ein bestimmter Bereich des Chromatins aufgelockert vorliegt (also in aktiver Form) oder dicht zusammengefaltet ist (inaktiv), wird von epigenetischen Markierungen beeinflusst. Dabei handelt es sich um Atomgruppen, die an Histonproteine des jeweiligen Chromatinabschnitts oder an die DNA selbst geheftet werden. Es gibt verschiedene Arten solcher Markierungen, und gemeinsam bestimmen sie darüber, wie dicht sich das Chromatin zusammenfaltet und wie intensiv die dort befindlichen Gene transkribiert, also in RNA umgeschrieben werden (siehe Kasten S. 24).

Epigenetische Modifikationen werden von diversen Enzymen vorgenommen. Einige von ihnen bringen die chemischen Markierungen an, andere entfernen sie wieder. C. David Allis von der Rockefeller University (USA), ein führender Forscher auf dem Gebiet, hat für diese Enzyme die Begriffe »Schreiber« und »Radierer« geprägt. So ist das Enzym Histonazetyltransferase, das Essigsäurereste an Histonproteine anheftet, ein Schreiber, und die Histondeazetylase, die solche Azetylgruppen wieder entfernt, ein Radierer. Die epigenetischen Markierungen ziehen weitere Proteine an, die dann als »Leser« fungieren: Sie lockern oder verdichten das umgebende Chromatin, indem sie zusätzliche regulatorische Proteine auf den Plan rufen, welche die Transkription der dort liegenden Gene fördern oder hemmen. Stark azetylierte Histonproteine ziehen »Leser« an, die das Chromatin lockern, und fördern zusätzlich das Erscheinen weiterer Proteine, die Gene aktivieren helfen. Stark methylierte Histonproteine hingegen können »Leser« anlocken, die die Transkription unterdrücken und die Gene somit inaktivieren.

Umwelteinflüsse steuern die Aktivität von Genen, indem sie das Verhalten der Schreiber und Radierer abwandeln, was zu einem veränderten Markierungsmuster des Chromatins führt. Manchmal sind die epigenetischen Modifikationen kurzlebig, etwa um Nervenzellen zu erlauben, auf eine intensive Stimulation rasch mit dem Freisetzen von Neurotransmittern zu antworten. Häufiger jedoch bleiben die Markierungen monate- oder jahrelang an Ort und Stelle, manchmal sogar lebenslang. Ein Beispiel hierfür ist das Verstärken oder Abschwächen neuronaler Verknüpfungen, um Gedächtnisinhalte zu speichern.

Azetyl- und Methylgruppen hinzuzufügen oder zu entfernen, trägt also – neben vielen anderen Formen der Markierung – dazu bei, dass das Gehirn sich an eine veränderte Umgebung anpassen und auf Erfahrungen reagieren kann. Epigenetische Prozesse können sich aber auch verhängnisvoll auswirken, etwa bei Drogensucht oder Depression. In Tierversuchen lösen veränderte Markierungsmuster an der DNA mitunter das Verlangen nach einer Droge aus, rufen Symptome einer Depression hervor oder prädisponieren auf andere Weise zu lebenslänglich fehlangepasstem Verhalten. Untersuchungen an menschlichem Hirngewebe, das nach dem Tod entnommen wurde, legen nahe, das Ähnliches auch beim Menschen zutrifft.

Unser Wissen darüber, wie Drogensucht entsteht, basiert auf der alten Erkenntnis, dass Rauschmittel das Belohnungszentrum im Gehirn sehr stark manipulieren können. So ergaben viele Studien, dass Kokain, Opiate und andere Suchtmittel bestimmte Gene in dieser Hirnregion aktivieren. Einige jener Effekte waren noch nach monatelangem Entzug nachweisbar, wobei es den Forschern schwerfiel, zu erklären, wie es zu den anhaltenden Veränderungen gekommen war. Meine Kollegen und ich begannen daher vor etwa zehn Jahren zu untersuchen, ob Kokain die Genaktivität in den Neuronen des Belohnungszentrums über epigenetische Modifikationen beeinflusst. Kokain ist eine starke Droge, die Tiere ebenso süchtig macht wie Menschen. Daher lassen sich die langfristigen Folgen des Kokainkonsums auch in Tierversuchen erforschen.

Droge schaltet Gene scharf

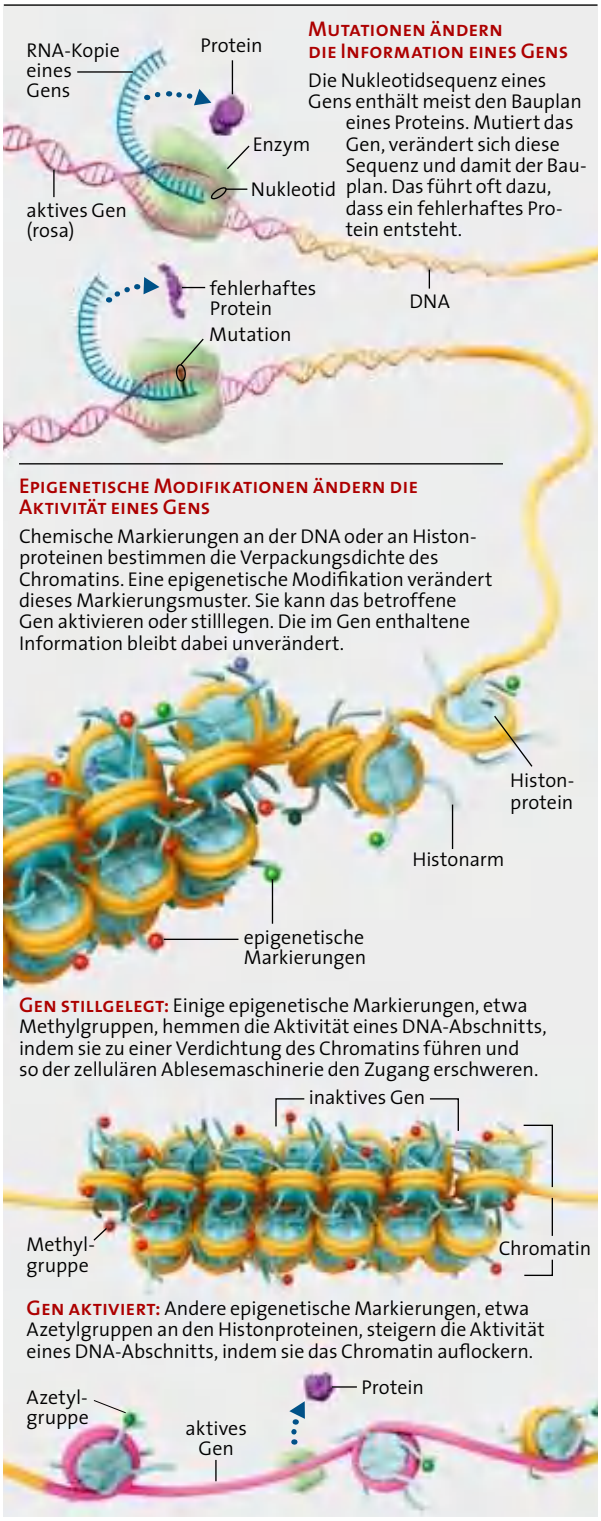
Eine einzelne Dosis Kokain ruft ausgeprägte und umfassende Veränderungen der Genexpression hervor, gemessen an der Konzentration der messenger-RNA – einem direkten Indikator für die Aktivität von Genen. Eine Stunde nachdem Mäuse ihre erste Kokaininjektion enthalten haben, sind in den Belohnungszentren ihrer Gehirne fast 100 Gene neu angeschaltet.

Noch interessanter ist, was mit Tieren geschieht, die über längere Zeit hinweg regelmäßig Kokain erhalten. Eine Hand voll der Gene, die bei der ersten Dosis in Aktion treten, verstummen, wenn die Droge jeden Tag verabreicht wird – sie werden »unempfindlich« gegenüber der Substanz. Bei einer viel größeren Anzahl von Erbfaktoren geschieht jedoch das Gegenteil: Sie erweisen sich bereits nach der ersten Kokaingabe als aktiver, doch die chronische Exposition steigert ihre Aktivität auf ein noch weit höheres Niveau, das selbst bei Entzug wochenlang anhält. Zudem reagieren diese Gene höchst empfindlich auf weitere Kokaingaben, auch wenn das Tier eine Zeit lang keine Droge erhält. Der chronische Konsum macht sie also »scharf« für eine künftige Aktivierung, er erlaubt ihnen gewissermaßen, sich an die Wirkung der Droge zu erinnern. Diese Sensibilisierung erhöht die Gefahr eines Rückfalls und bahnt den Weg zur Sucht.

Mit Labortechniken, die epigenetische Veränderungen im gesamten Mausgenom erfassen, konnten wir nachweisen,

Genetik und Epigenetik

Psychiatrische Erkrankungen sind offenbar häufig begleitet von epigenetischen Modifikationen im Erbgut von Hirnzellen. Dabei bleibt zwar die DNA-Sequenz gleich, es ändert sich aber die Aktivität von Genen. Als Folge davon können die Funktionen des Gehirns und anderer Organe beeinträchtigt werden.



dass chronischer Kokaingebrauch die Methyl- und Azetylmarkierungsmuster hunderter Gene im Belohnungszentrum des Gehirns spezifisch umgestaltet. Meist führen diese Veränderungen zu einem Auflockern der Chromatinstruktur, so dass die Gene bei erneuter Drogengabe leichter aktivierbar sind. Auch hier halten viele Veränderungen nur vorübergehend an. Andere jedoch bleiben länger bestehen: Manche lassen sich noch einen Monat nach der letzten Kokainexposition nachweisen – beachtlich lange, wenn man berücksichtigt, dass die Lebenserwartung von Mäusen nur wenige Jahre beträgt.

Allmählich kristallisieren sich die Mechanismen dieser dauerhaften Veränderungen heraus. Wie meine Mitarbeiter und ich entdeckt haben, dämpft Kokain die Aktivität bestimmter »Radierer«, die Azetylgruppen entfernen, sowie spezieller »Schreiber«, die hemmende Methylgruppen hinzufügen. Stärker azetyliertes und/oder schwächer methyliertes Chromatin liegt aufgelockert vor, so dass die Gene dort leichter abgelesen werden können. Darüber hinaus beeinflusst chronischer Kokainkonsum die Aktivität weiterer Enzyme im Belohnungszentrum des Gehirns und hinterlässt diverse epigenetische Markierungen, die zum Anschalten von Genen führen.

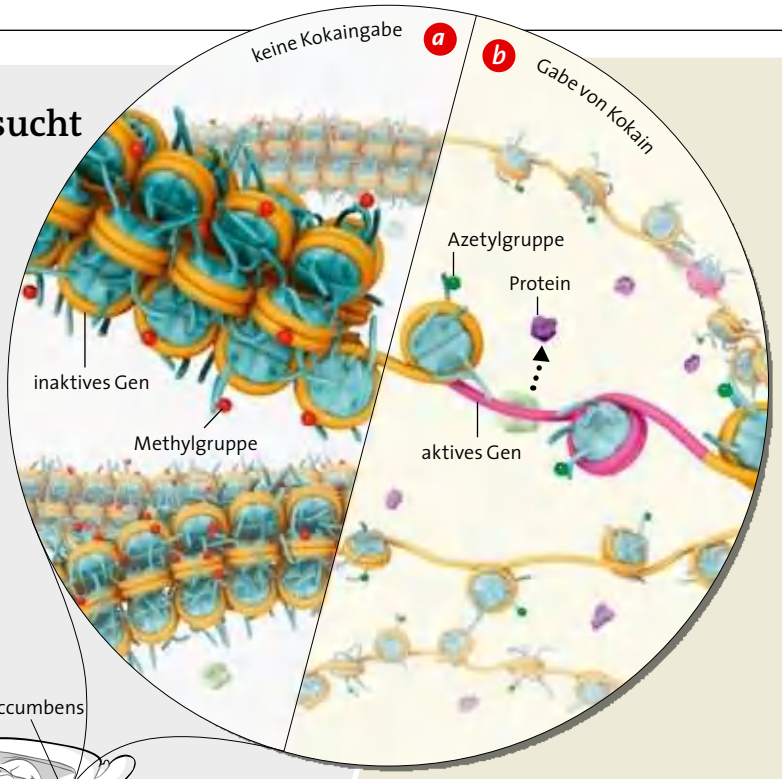
Die veränderte Funktion der »Schreiber« und »Radierer« bei anhaltender Kokainexposition hält langfristig an, was der Grund für die dauerhaft veränderten Aktivitäten der betroffenen Gene sein könnte – und für die Art und Weise, in der das Tier auf künftige Gaben der Droge reagiert. Da das Beloh-

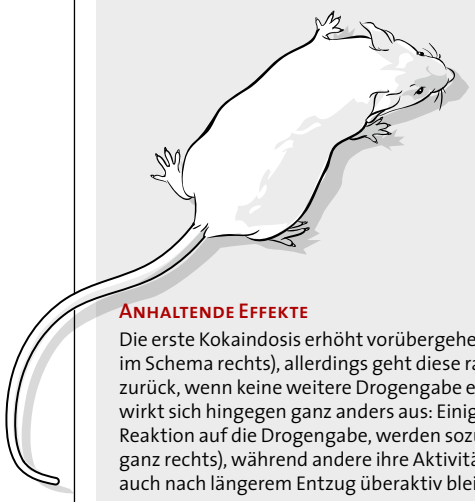
Die Epigenetik der Drogensucht

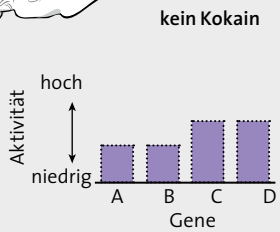
Studien an Mäusen zeigen, dass regelmäßige Kokaingaben zu einem veränderten Muster epigenetischer Markierungen im Belohnungszentrum des Gehirns führen. Dies erhöht die Empfindlichkeit für die Drogenwirkung und steigert die Suchtgefahr.

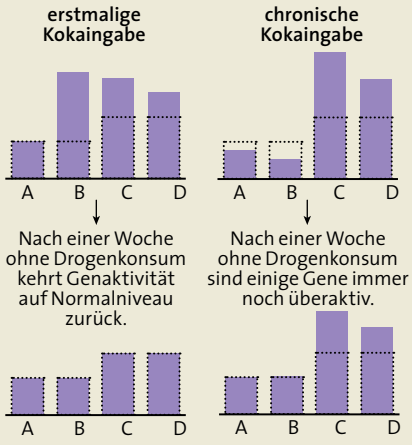
Schon eine einzige Dosis Kokain …

… kann bei den Tieren das Muster epigenetischer Markierungen im Nucleus accumbens (einem Teil des Belohnungszentrums) verändern. In Abwesenheit der Droge dominieren Methylgruppen (*a*), wodurch das Chromatin dicht gepackt vorliegt und viele Gene stillgelegt sind. Unter dem Einfluss von Kokain werden vermehrt Azetylgruppen an die Histone geheftet, was das Chromatin auflockert (*b*). Dies akiviert viele Gene, deren Proteine an der Reaktion des Organismus auf die Droge beteiligt sind.









Anhaltende Effekte

Die erste Kokaindosis erhöht vorübergehend die Aktivität vieler Gene (B, C, D im Schema rechts), allerdings geht diese rasch wieder auf das normale Maß zurück, wenn keine weitere Drogengabe erfolgt. Chronischer Kokainkonsum wirkt sich hingegen ganz anders aus: Einige Gene drosseln ihre Aktivität in Reaktion auf die Drogengabe, werden sozusagen unempfindlich (A und B, ganz rechts), während andere ihre Aktivität weiter steigern (C und D) und auch nach längerem Entzug überaktiv bleiben.

AXS BIOMEDICAL ANIMATION STUDIO

nungszentrum des Gehirns auf ein breites Spektrum von Reizen antwortet, einschließlich Essen und Sex, können Funktionsstörungen in diesem Hirnareal das Verhalten eines Tiers fundamental verändern.

Neuronale Anpassungen, die das Verhalten langfristig beeinflussen, liegen auch der Depression zu Grunde, einer der häufigsten und folgenreichsten psychiatrischen Erkrankungen. Wie bei Sucht lassen sich viele Aspekte der Depression in Tiermodellen untersuchen. In unserem Labor arbeiten wir mit Mäusen, die anhaltendem sozialem Stress ausgesetzt gewesen sind, etwa indem zahme Männchen zehn Tage lang mit aggressiven zusammengesperrt wurden. Die unterlegenen Männchen zeigen hinterher oft Symptome, die denen bei depressiven Menschen ähneln: Sie verlieren das Interesse für attraktive Weibchen und Süßigkeiten, sind ängstlich, teilnahmslos und wenig unternehmungslustig. Manche fressen auch übermäßig viel, so dass sie stark zunehmen. Einige dieser Veränderungen halten monatelang an.

In der DNA von Neuronen aus den Belohnungszentren dieser Mäuse fanden wir etwa 2000 Gene epigenetisch modifiziert. 1200 davon waren übermäßig methyliert und somit in ihrer Aktivität unterdrückt. Anscheinend werden bei einer Depression also zahlreiche Gene im Belohnungszentrum des Gehirns herunterreguliert, was das Wohlbefinden mindert und eine Art molekulare Narbe erzeugt. Viele der Veränderungen ließen sich rückgängig machen, indem wir die Tiere einen Monat lang mit Imipramin behandelten, einem häufig verschriebenen Antidepressivum. Ähnliche epigenetische Modifikationen wie bei unseren depressiven Mäusen finden sich auch im Hirngewebe von Menschen, die zum Zeitpunkt ihres Todes an einer Depression gelitten hatten.

Die Depression ist eine häufige Erkrankung, doch nicht alle Menschen sind gleichermaßen gefährdet. Offenbar gilt das auch für Mäuse. Etwa ein Drittel der Männchen, die täglich mit einem aggressiven Artgenossen zusammengesperrt wurden, erwies sich als depressionsresistent und zeigte weder Anzeichen von Antriebslosigkeit noch von Zurückgezogenheit. Diese psychische Belastbarkeit spiegelt sich auch im Genom wieder. Viele stressbedingte epigenetische Modifikationen, die bei depressiven Tieren auftraten, fanden sich bei den resistenten Mäusen nicht. Dafür jedoch wiesen Letztere epigenetische Abwandlungen in einem Satz von Genen auf, der bei depressiven Tieren nicht verändert war. Die außerordentliche psychische Belastbarkeit mancher Mäuse könnte demnach auf einem aktiven epigenetischen Programm beruhen, das die Wirkungen von chronischem Stress bekämpft.

Wir fanden außerdem heraus, dass diese »schützenden« DNA-Abschnitte auch solche Gene einschließen, deren Aktivität sich bei depressiven Mäusen während der Behandlung mit Imipramin normalisiert. Einige der Gene steigern die Aktivität des Belohnungszentrums im Gehirn und dürften dazu beitragen, Depressionen abzuwehren. Möglicherweise entfalten also Antidepressiva ihre Wirkung zum Teil dadurch, dass sie epigenetische Programme in Gang setzen, die sonst eher bei depressionsresistenten Individuen aktiv sind. Falls das zutrifft, sollten sich Medikamente entwickeln lassen, die die psychische Widerstandskraft steigern – zusätzlich zu Arzneien, die die schädlichen Auswirkungen von chronischem Stress verhindern.

Die bisher beschriebenen Effekte halten bei Mäusen bis zu einen Monat an; längere Zeiträume haben wir noch nicht untersucht. Doch epigenetische Modifikationen können auch lebenslange Verhaltensänderungen bewirken, wie Michael Meaney und seine Kollegen von der McGill University (Kanada) berichteten. Meaney interessierte sich für den Einfluss mütterlicher Fürsorge auf epigenetische Muster und Verhaltensweisen bei Ratten.

Manche Rattenweibchen pflegen und umsorgen ihre Jungen besonders hingebungsvoll. Andere legen bei der Brutpflege wenig Eifer an den Tag. Die Wissenschaftler beobachteten, dass die Nachkommen der liebevollen Müttern in belastenden Situationen weniger ängstlich sind und weniger Stresshormone ausschütten als Jungtiere von eher passiven Rattenmüttern. Zudem kümmerten sich die fürsorglich aufgezogenen Töchter später selbst vorbildlich um ihren Nachwuchs.

Schlechtes Elternhaus belastet die Nachkommen ein Leben lang

Meaneys Gruppe belegte, dass diese Effekte zumindest teilweise über epigenetische Mechanismen vermittelt werden. Bei Jungtieren von passiven, wenig fürsorglichen Müttern waren die regulatorischen Sequenzen des Gens für den Glukokortikoidrezeptor verstärkt methyliert. Der Rezeptor kommt in den meisten Körperzellen vor und vermittelt die Reaktion auf das Stresshormon Cortisol. Die vermehrte Methylierung war unter anderem im Hippocampus nachweisbar, einer Hirnregion, die für Lernprozesse und Gedächtnisleistungen wichtig ist. Die betroffenen Nervenzellen dort produzierten weniger Rezeptormoleküle. Dies verstärkt die Stressreaktionen der Tiere, da aktivierte Glukokortikoidrezeptoren im Hippocampus die Cortisolproduktion im Körper drosseln. Die betroffenen Mäuse sind ängstlicher und leichter zu verunsichern – und bleiben es ein Leben lang.

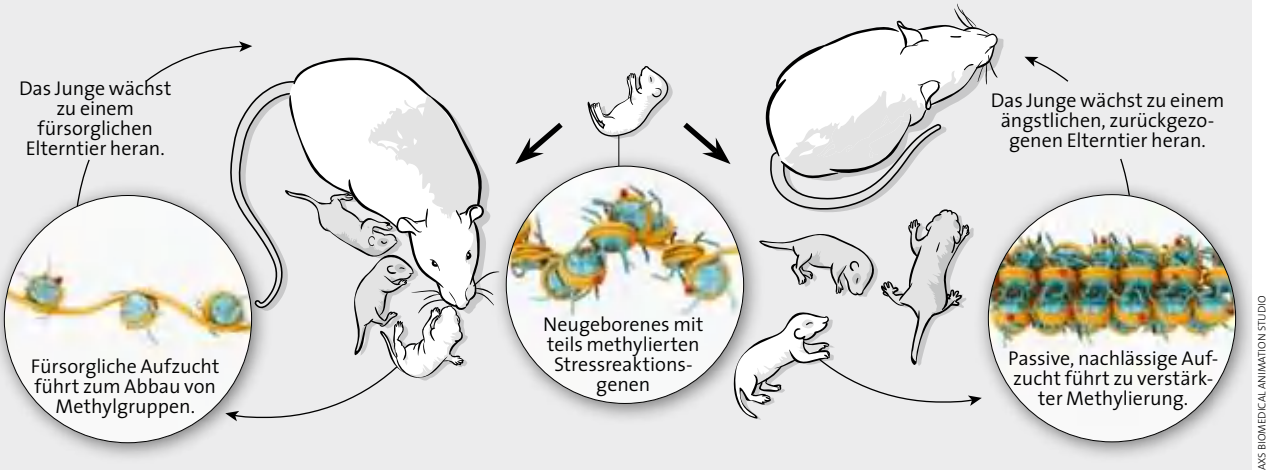
Neben den Effekten auf den Glukokortikoidrezeptor gibt es offenbar noch andere Wirkungen. Frances Champagne und ihre Kollegen von der Columbia University (USA) fanden epigenetische Unterschiede zwischen Jungtieren von aktiven und passiven Rattenmüttern auch an einem Gen, das für den Östrogenrezeptor kodiert. Es ist daher wahrscheinlich, dass veränderte Markierungsmuster noch vieler weiterer Gene die Reaktionen auf mütterliches Verhalten beeinflussen.

Zusammengenommen sprechen die Ergebnisse sogar dafür, dass epigenetische Modifikationen an die folgende Generation weitergegeben werden können, obwohl sie nicht in den Keimzellen auftauchen. Das Verhalten des Muttertiers verändert epigenetische Muster im Gehirn ihrer Jungen, worauf diese später das gleiche Verhalten an den Tag legen und somit ihre Nachkommen entsprechend prägen und so fort.

Eine der großen Aufgaben für die kommenden Jahrzehnte wird es sein, die Zusammenhänge zwischen epigenetischen

Vererbung jenseits des Erbguts

Epigenetische Modifikationen beeinflussen das Verhalten von Ratten. Wie Versuche gezeigt haben, können die dabei erworbenen Muster sogar über Generationen weitergegeben werden, ohne dass sie in den Keimzellen auftreten. Nach der Geburt eines Jungtiers werden einige seiner Gene, die an der Regulation von Stressreaktionen beteiligt sind, mit hemmenden Methylgruppen versehen, was die Stressempfindlichkeit steigert. Wachsen die Jungtiere unter der Obhut einer fürsorglichen Mutter auf (links), dann werden viele dieser Methylgruppen wieder entfernt, was die Tiere furchtloser und belastbarer macht. Im Erwachsenenalter erweisen sie sich dann ihrerseits als ruhige und fürsorgliche Eltern. Verhält sich die Mutter der Jungtiere hingegen ängstlich und teilnahmslos, so nimmt bei den Jungen die Zahl der Methylgruppen auf den entsprechenden Genen zu. Später geben sich diese Tiere dann ebenfalls ängstlich und passiv.



Modifikationen und individuellem Verhalten für bessere Therapien gegen psychiatrische Erkrankungen zu nutzen. Arzneistoffe, die die Azetylierung des Chromatins fördern – indem sie Enzyme hemmen, die diese Gruppen von den Histonproteinen entfernen –, wirken stark antidepressiv. Meaney beobachtete zudem, dass die gleichen Substanzen auch fürsorgliches Brutpflegeverhalten begünstigen. Wahrscheinlich kann die ausgeprägte Methylierung einiger Chromatinbereiche, die bei Jungtieren von nachlässigen Rattenmüttern zu beobachten ist, von einer verstärkten Azetylierung kompensiert werden.

Diese Ergebnisse machen Hoffnung. Es sind auch bereits Hemmstoffe von Histondeazetylasen (also Stoffe, die das Entfernen von Azetylgruppen unterbinden) als Medikamente zugelassen. Allerdings dürften sie kaum geeignet sein, um psychiatrische Erkrankungen zu behandeln. Denn Histondeazetylasen beteiligen sich an der epigenetischen Regulation im gesamten Gehirn und überall sonst im Körper, so dass ihre wahllose Hemmung schwere Nebenwirkungen verursachen kann. Ein Ausweg wären Wirkstoffe, die Histondeazetylasen selektiv hemmen – und zwar gezielt in den Hirnregionen, die von der jeweiligen Erkrankung am stärksten betroffen sind, etwa im Belohnungszentrum.

Eine andere Alternative bestünde darin, neue Proteine zu finden, die an epigenetischen Modifikationen im Gehirn mitwirken, und diese dann gezielt zu beeinflussen. Der vermutlich fruchtbarste Ansatz besteht jedoch darin, jene Gene zu identifizieren, die bei Depression oder Sucht veränderten Markierungsmustern unterworfen sind: zum Beispiel DNA-Abschnitte, die für bestimmte Neurotransmitterrezeptoren oder für Signalproteine kodieren. Anschließend könnten wir versuchen, Medikamente zu entwickeln, die selektiv die Aktivität dieser Gene oder ihrer Proteine beeinflussen.

Höchst spannend und noch unbeantwortet ist die Frage, in welchem Umfang epigenetische Modifikationen vererbt werden, die bei neuropsychiatrischen Erkrankungen auftreten. In Meaneys Studien an Ratten »erbten« weibliche Jungtiere bestimmte Verhaltensmuster – und das entsprechende epigenetische Profil – von ihren Müttern. Doch diese Veränderungen betreffen das Chromatin von Hirnzellen. Sie treten nicht in den Keimzellen auf, aus denen der Embryo entsteht. Aber können individuelle Erfahrungen vielleicht auch epigenetische Muster in Spermien und Eizellen verändern, auf dass diese dann direkt an die Nachkommen weitergegeben werden?

Die Annahme, dauerhafter Drogenkonsum oder chronischer Stress könne die Genaktivität in Keimbahnzellen beeinflussen, ist sicher nicht zu weit hergeholt. Schließlich verteilen sich Stresshormone und Wirkstoffe von Rauschmitteln mit dem Blutstrom über den ganzen Organismus, einschließlich der Hoden und Ovarien. Es ist jedoch nicht ohne Weiteres zu erklären, wie epigenetische Modifikationen

in Keimbahnzellen auf die Nachkommen übergehen sollten. Denn die erworbenen Markierungsmuster werden während der Zellteilungen, die Spermien und Eizellen hervorbringen, gelöscht. Und selbst wenn sie an den Embryo weitergegeben würden: Wie sollten sie dann Genaktivitäten gezielt in spezifischen Hirnregionen oder endokrinen Organen des Erwachsenen steuern?

In den Fußstapfen des Vaters

Solche Einwände wiegen schwer. Nichtsdestoweniger gibt es experimentelle Befunde, die darauf hindeuten, dass manche epigenetische Muster doch erblich sein könnten. Verschiedene Arbeitsgruppen berichten, dass Nagetiere, die chronischem Stress ausgesetzt sind, Jungtiere gebären, die besonders empfindlich auf Stressbelastungen reagieren. Isabelle Mansuy und ihre Kollegen von der Universität Zürich etwa trennten neugeborene, männliche Mäuse in den ersten beiden Lebenswochen von ihren Müttern. Als die Tiere herangewachsen waren, wiesen sie Anzeichen depressiven Verhaltens auf. Wenn diese Männchen nun normale Weibchen begatteten, dann zeigten die daraus hervorgehenden Nachkommen ein ganz ähnliches depressives Verhalten im Erwachsenenalter – obwohl sie selbst behütet aufgewachsen waren. Diese vererbte Anfälligkeit ging einher mit veränderten Methylierungsmustern an bestimmten Genen in der DNA von Spermien und Hirnzellen.

Meine Mitarbeiter und ich haben ähnliche Experimente durchgeführt. Wieder setzten wir männliche Mäuse unter Stress, indem wir sie dauerhaft mit aggressiven Artgenossen zusammenbrachten. Dann warteten wir einen Monat, ließen die gestressten Männchen sich mit normalen Weibchen paaren und stellten fest, dass die Nachkommen stark dazu neigten, die Symptome einer Depression auszubilden. Dann gingen wir noch einen Schritt weiter. Wenn die epigenetischen Modifikationen, die das Depressionsrisiko erhöhen, tatsächlich im engeren Sinn erblich wären, müssten sie die Keimzellen betreffen. Also entnahmen wir den gestressten Männchen Spermien und befruchteten damit Eizellen von normalen Weibchen. Die Nachkommen, die aus dieser künstlichen Befruchtung hervorgingen, verhielten sich aber fast normal. Sie zeigten nur sehr gering ausgeprägte Symptome von Ängstlichkeit und Teilnahmslosigkeit.

Das beantwortet die Frage nach der direkten Vererbbarkeit epigenetischer Markierungsmuster zwar nicht endgültig, denn diese könnten irgendwie im Zuge der künstlichen Befruchtung verloren gegangen sein. Die Ergebnisse lassen jedoch vermuten, dass Weibchen, die sich mit verängstigten Männchen paaren, ihre Jungen anders behandeln als Mäusemütter, die ihre Kinder von einem »normalen« Männchen haben oder die den Vater ihrer Jungtiere nie zu Gesicht bekommen. Die Neigung zur Depression, die wir in unseren Versuchen bei den Jungtieren beobachtet haben, wäre dann eher auf frühkindliche Erfahrungen zurückzuführen als auf die direkte Vererbung epigenetischer Muster über die Keimzellen.

Das muss nicht bedeuten, das eine solche Vererbung unmöglich ist. Bislang haben wir aber keinen überzeugenden Beleg dafür, dass sie stattfindet. Um ihn zu liefern, müssten wir experimentelle Methoden entwickeln, mit denen sich die epigenetischen Veränderungen in Keimzellen nachweisen lassen, und wir müssten beweisen, dass diese Veränderungen sowohl notwendig als auch hinreichend sind, um die Vererbung der beobachteten Merkmale zu erklären.

Der Biologe Jean-Baptiste Lamarck, der im 18. Jahrhundert lebte, ist bekannt geworden durch seine Theorie, dass erworbene Merkmale vererbt werden können. Seiner Vorstellung zufolge können Eigenschaften, die ein Individuum im Lauf des Lebens ausprägt, etwa eine gut entwickelte Muskulatur, auf die Nachkommen übergehen. Mittlerweile wissen wir, dass vor allem die Gene die Merkmale und Funktionen eines Organismus bestimmen. Forscher finden jedoch immer deutlichere Hinweise darauf, dass Umwelteinflüsse und individuelle Erfahrungen das ganze Leben lang die Aktivität von Genen verändern. Somit beeinflussen sie auch, wie sich die genetisch vorbestimmten Merkmale manifestieren – über epigenetische Mechanismen. Es bleibt aber noch viel zu tun, wenn wir verstehen wollen, wie solche Modifikationen unser Verhalten beeinflussen, in welchem Ausmaß sie uns für psychiatrische Erkrankungen anfällig machen und ob sie an nachfolgende Generationen weitergegeben werden können. Lamarck hätte sich sicher mit Eifer an der Debatte beteiligt.

DER AUTOR

Eric J. Nestler ist Direktor am Friedman Brain Institute des Mount Sinai Medical Center in New York. Er forscht über molekulare Mechanismen, die Drogensucht und Depression verursachen.

QUELLEN

Cameron, N. M. et al.: Epigenetic Programming of Phenotypic Variations in Reproductive Strategies in the Rat through Maternal Care. In: Journal of Neuroendocrinology 20, S. 795–801, 2008

Franklin, T. B. et al.: Epigenetic Transmission of the Impact of Early Stress across Generations. In: Biological Psychiatry 68, S. 408–415, 2010

Maze, I., Nestler, E. J.: The Epigenetic Landscape of Addiction. In: Annals of the New York Academy of Sciences 1216, S. 99–113, 2011

Roth, T. L. et al.: Epigenetic Regulation of Genes in Learning and Memory. In: Essays in Biochemistry 48, S. 263–274, 2010

Tsankova, N. et al.: Epigenetic Regulation in Psychiatric Disorders. In: Nature Reviews Neuroscience 8, S. 355–367, 2007

WEBLINKS

www.epigenome.org
Website des Human Epigenome Project, das zum Ziel hat, DNA-Methylierungsmuster in menschlichen Geweben zu identifizieren

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1155288**

ESSAY

Patente auf Leben – ein umstrittenes Thema

Welche Auswirkungen das Verbot von Patenten auf embryonale Stammzellen durch den Europäischen Gerichtshof (EuGH) vom Oktober 2011 hat, ist noch immer unklar. Der Wissenschaftsphilosoph und Ethiker Ludwig Siep beleuchtet einige grundlegende Aspekte der weit reichenden Entscheidung. Seine These: Gründe für ein prinzipielles Verbot von Patenten auf Verfahren mit menschlichen Zellen sind kaum erkennbar.

Von Ludwig Siep

Die Entscheidung des Europäischen Gerichtshofs (EuGH) gegen die Patentierbarkeit der Differenzierung embryonaler Stammzellen in neurale Vorläuferzellen hat die Debatte um die Forschung an menschlichen embryonalen Stammzellen wieder angefacht. Zwar unterscheidet das Urteil strikt zwischen Forschung einerseits und Patentierung andererseits, es ist kein Forschungsverbot; auch beschränkt es seine Reichweite ausdrücklich auf die Auslegung der europäischen Patentrichtlinie. Aber in der Begründung des Urteils bezeichnet der EuGH die Zerstörung von Blastozysten (siehe Grafik S. 31) zur Entnahme von embryonalen Stammzellen mit dem Zweck der späteren kommerziellen Verwertung als Verstoß gegen die Menschenwürde. Diese darf selbst die Grundlagenforschung nicht verletzen.

Das Urteil berührt auch eine Reihe von philosophisch wichtigen Fragen. Ist Patentierung von Verfahren mit menschlichem Zellmaterial grundsätzlich verboten? Das möchte ich bezweifeln. Ist sie dann verboten, wenn dafür Embryonen zerstört werden? Auch das bejaht das Gericht nicht. Denn es verbietet Patentierung zu Zwecken der Forschung an embryonalen Zellen nicht – zu Recht, wie ich glaube. Eindeutig verurteilt es jedoch die Patentierung zu kommerziellen Zwecken. Dafür gibt es aus philosophischer Sicht keine hinreichenden Gründe. Eine Patentierung von Verfahren mit embryonalen Stammzellen, die zu vermarktbaren Arzneimitteln führt, ist ethisch nicht grundsätzlich verboten.

Eine Unterscheidung zwischen Forschung und Patentierung kann im Hinblick auf eine spätere gewerbliche Verwendung nur auf einer von zwei Voraussetzungen beruhen:

- Entweder wird vermutet, dass die Forschung mit den bereits existierenden Zelllinien auskommt, jede mögliche gewerbliche Verwendung dagegen auf neue angewiesen ist. Das erscheint wenig plausibel, da schon mehr als 1000 registrierte embryonale Stammzelllinien weltweit existieren – mit zunehmender Tendenz – und überdies jährlich hunderttausende befruchtete Eizellen in Reproduktionskliniken verworfen werden.
- Oder es wird angenommen, die Zerstörung von Embryonen verstoße im Hinblick auf spätere kommerzielle Verwertung grundsätzlich gegen die Menschenwürde, während das bei der Forschung nicht der Fall sei. Da die Gerichtsentscheidung von »Ausgangsmaterial« für »kommerzielle«, also mit Verkauf und privatem Gewinn verbundene Verwertung spricht, liegt eine solche Annahme nahe.

Auch Artikel 6, II der EU-Biopatentrichtlinie sowie Paragraf 2, Absatz 3 des deutschen Patentgesetzes besagen, dass »insbesondere ... für die Verwendung von menschlichen Embryonen zu industriellen oder kommerziellen Zwecken« Patente nicht erteilt werden können. Noch weiter gehen viele

AUF EINEN BLICK

GRENZEN DER MENSCHENWÜRDE?

1 Im Oktober letzten Jahres erließ der Europäische Gerichtshof ein **Patentverbot auf Verfahren mit embryonalen Humanstammzellen**. Dieses Urteil dürfte weit reichende Konsequenzen für die biomedizinische Forschung und Entwicklung haben.

2 Grundsätzlich sind Patente auch auf Verfahren mit menschlichen Zellen möglich. Die Grenzen liegen jedoch in den Rechten, die den Embryonen zugemessen werden, aus denen embryonale Stammzellen stammen; das ist eine **normative Entscheidung**.

3 Um sie zu treffen, muss man zwischen einem absoluten und einem gradualistischen Standpunkt abwägen. Die Frage lautet, ob die **volle Menschenwürde** bereits der befruchteten Eizelle oder erst dem Embryo schrittweise im Lauf seiner Entwicklung zugebilligt wird.

Kampagnen gegen Patente oder umfassender gegen jedwedes »Eigentum« an Leben.

Es lohnt sich, diese Prämisse einmal aus Sicht der praktischen Philosophie zu untersuchen, in der es um die Begründung von Normen für konkretes menschliches Handeln geht. Patentierung ist eine Form des Schutzes geistigen Eigentums. Sie verleiht jedoch keine unbegrenzte private Verfügungsgewalt, sondern lediglich das Recht, andere für einen gewissen Zeitraum von der gewerblichen Nutzung einer Erfindung oder »technischen Lehre« auszuschließen – gegenwärtig in der Regel für 20 Jahre.

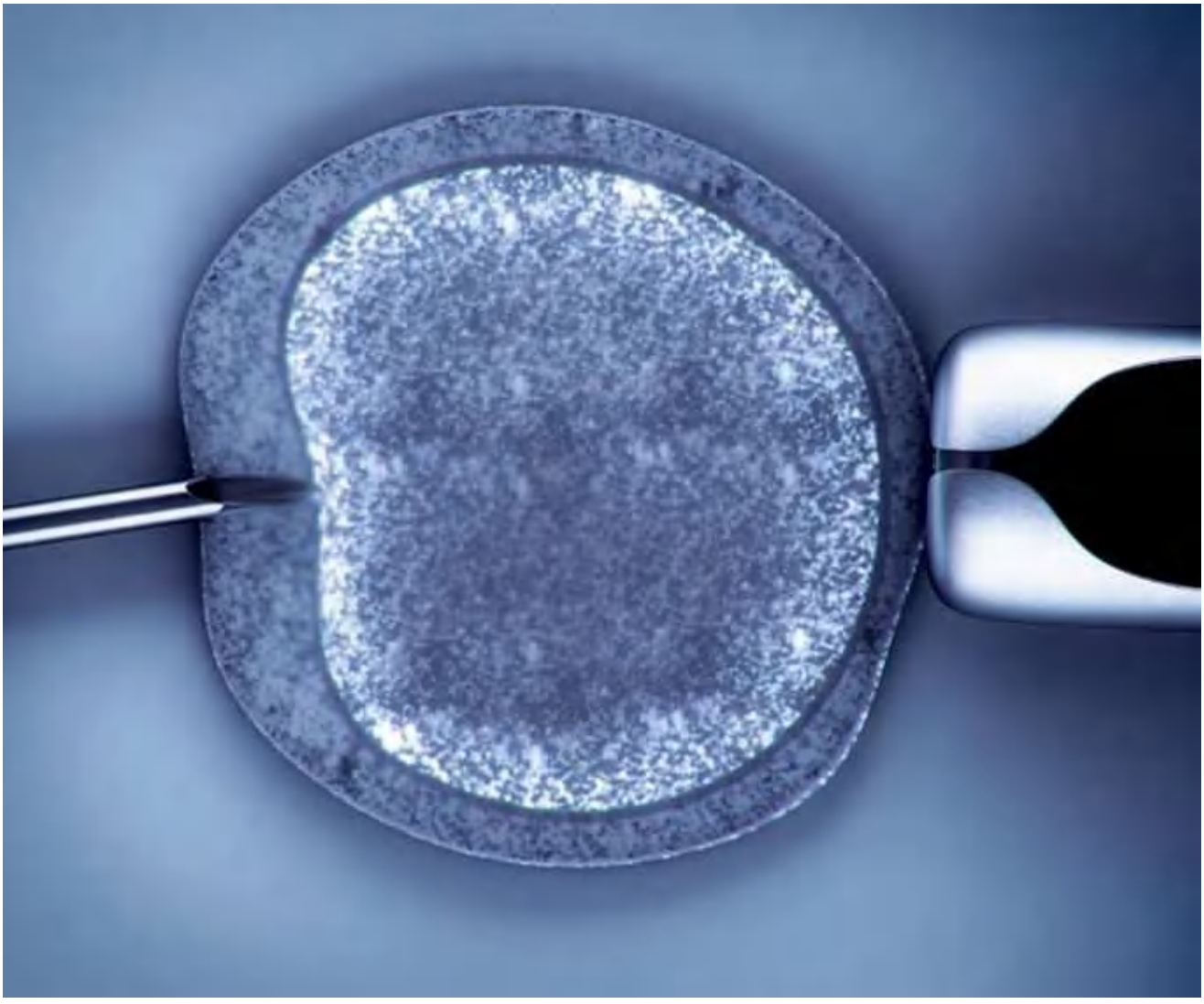
Anreize für das Gemeinwohl

Die Begründung dafür ist, wie beim Eigentum insgesamt, sowohl individualrechtlich als auch gemeinwohlorientiert. In Bezug auf die Rechte des *Individuums* soll ein Schutz der Originalität seiner geistigen Schöpfung gesichert werden. Anders als bei materiellem Eigentum können geistige Produkte ja mit ihrer Veröffentlichung von jedem benutzt werden, wenn sie nicht besonders rechtlich geschützt sind. Hierfür existieren verschiedene Formen, vom Urheberrecht über das Plagiatsverbot bis zum Patentrecht.

Die *gemeinwohlorientierte* Begründung lautet, dass materielle Anreize die Anstrengungen für Erfindungen, die für alle nützlich sind, steigern – insbesondere durch Versuche, sie zu übertreffen oder das Ziel auf anderen Wegen zu erreichen. Ob dies wirklich zutrifft, ist im Grunde eine empirische Frage. Aber die Entwicklung der Technik in den letzten zwei Jahrhunderten, die ohne Patente kaum vorstellbar ist, scheint diese Erfahrung reichlich zu belegen.

Natürlich gehen mit Urheberrechten eine Reihe von Problemen einher, vor allem in Zeiten der elektronischen Datenverarbeitung. Das betrifft etwa die Lizenzgebühren für patentierte Verfahren – man denke an Arzneimittelkosten in armen Ländern – oder das Herunterladen von Dateien aus

Patente auf Verfahren mit embryonalen Stammzellen schwören Konflikte herauf zwischen Kommerz, Forschungsfreiheit und Menschenwürde. Im Bild: eine Eizelle bei künstlicher Befruchtung.



DREAMSTIME / DIGITALBALANCE, DAVID FRAASS

Glossar

Allmende (»Gemeine Mark«): Das sind in der Regel landwirtschaftliche Flächen, die der Gemeinde gehören und gemeinschaftlich genutzt werden.

EuGH: Der in Luxemburg beheimatete Gerichtshof der Europäischen Union sorgt für eine einheitliche Auslegung des EU-Rechts. Damit garantiert er, dass es »in allen EU-Mitgliedstaaten auf die gleiche Weise angewendet wird«. Der EuGH kann auch juristische Auseinandersetzungen klären, die zwischen Regierungen der EU-Mitgliedstaaten und den EU-Organen auftreten.

Stammzellen: Das sind Körperzellen, die sich in verschiedene Zelltypen oder Gewebe weiterentwickeln können. Während embryonale Stammzellen nur im frühen Embryo auftreten, sind **adulte** Stammzellen auch nach der Geburt noch im Organismus vorhanden. Können Stammzellen sich in mehr als eine Zell- oder Gewebeart entwickeln, sind sie **multipotent** oder **pluripotent**. Das heißt, sie sind dann in viele oder alle Zellarten außer das Nährgewebe, den Trophoblasten, entwicklungsfähig. Zu **induzierten pluripotenten** Stammzellen (iPS) werden nichtpluripotente Stammzellen durch künstliche Reprogrammierung.

Totipotenz: Die Fähigkeit einer Zelle, sich zu einem vollständigen Individuum zu entwickeln.

Tetraploide Komplementierung: Bei dieser werden aus embryonalen Stammzellen lebens- und fortpflanzungsfähige Individuen erzeugt. Benötigt werden dazu Hilfszellen, die man durch Zellfusion tetraploid gemacht hat; diese Hilfszellen stellen sicher, dass das Cluster aus embryonalen Stammzellen sich im Uterus implantieren und eine geordnete Morphogenese vollziehen kann.

dem Internet. Die Frage ist aber, ob solche Probleme ihre Ursache im Eigentums- oder Patentrecht selbst haben oder eher im wirtschaftsethischen und -politischen Umgang mit Patenten. Beispielsweise ist es sicher problematisch, wenn Großunternehmen in der Agrar- oder Pharmaindustrie auf bestimmten Gebieten das Monopol an einer Vielzahl von Patenten besitzen.

Eigentum jeder Art ist bekanntlich sozialpflichtig, und der Staat oder überstaatliche Rechtsorgane müssen dafür sorgen, dass sich niemand Monopole an lebenswichtigen Gütern aneignet. Dazu gehört auch, die Verwertung schon erreichten menschlichen Wissens über Jahrzehnte anderen vorzuenthalten, es selbst aber nicht voranzutreiben. Das gilt besonders für den medizinischen Bereich. Immerhin gibt es hier bereits eine Reihe von Patentausschlüssen, etwa bei ärztlichen Diagnosen und Therapien.

Gegen Patentierung von Verfahren mit lebendigem Material, vor allem menschlichen Körperteilen, werden gerne grundsätzlichere Argumente geltend gemacht, die sich philosophisch prüfen lassen. Eine zwingende Entscheidung darf man dabei nicht erwarten, aber doch die Klärung einiger Argumente. Dass Lebendiges prinzipiell Eigentum sein darf, ist jedenfalls in modernen Kulturen, in denen Pflanzen und Tiere nicht mehr als Träger höherer Geister gelten, im Wesentlichen unbestritten. Eigentum an Tieren ist selbst in Kulturen gebräuchlich, in denen Vorstellungen der Seelenwanderung vorherrschen. An seine Grenzen kann das Eigentum an Leben aber bezüglich der moralischen Überzeugungen einer Rechtsgemeinschaft gelangen. So kann eine Baumschutzordnung das Fällen alter Bäume auf Privatgrundstücken einschränken oder ein Tierschutzrecht nicht nur unnötigen Schmerz verbieten, sondern auch tier- oder artgerechte Behandlung vorschreiben.

Die Frage nach Patenten an Lebendigem wurde aber erst im Zeitalter der Biotechnologie besonders virulent. Denn Patente sind technische Lehren (also Erfindungen, die zum technischen Handeln befähigen), die berechenbare Gesetze und standardisierbare Verfahren voraussetzen. Diese »Technisierbarkeit« der lebendigen Natur erweckt heute offenbar Befürchtungen. Denn zum einen verstehen wir inzwischen neben der Technik auch die Biologie besser: Verhaltens- und Systembiologie haben uns die Welt der Lebewesen und ihre Vernetzungen erschlossen. Zu diesem Wissen kommt bei vielen die schmerzliche Erfahrung, dass natürliche Arten und Lebensräume verloren gehen, wenn sich mit der industriellen Zivilisation Fabriken, Megastädte und landschaftszerstörende Verkehrswege ausbreiten. Die Wertschätzung der natürlichen Mannigfaltigkeit und spontaner natürlicher Prozesse hat zu weltweiten Rechtskonventionen oder nationalen Gesetzgebungen geführt, die etwa Biodiversität und Arten schützen sollen.

Mit wachsender Weltbevölkerung und zunehmenden Erwartungen bezüglich Lebensniveau und -dauer wird es aber immer unwahrscheinlicher, dass auf Biotechnologie völlig verzichtet werden kann. Schon jetzt sind Medizin und Arzneimittelentwicklung ohne sie undenkbar. Ob Ernährung und Umweltschutz heute oder in Zukunft ohne diese Techniken auskommen können, ist zumindest offen. Wie man vernünftig mit der Biotechnologie umgeht, ist eine Frage von Politik, Recht und guten Sitten. Das gilt selbstverständlich ebenso für den Umgang mit dem Eigentums- und Patentrecht. Bei Ersterem ist bekannt, dass es sehr verschiedene Formen annehmen kann. Auch Allmendewirtschaft (siehe Glossar links) oder Kooperativen lassen schließlich privates Eigentum zu – etwa an Weidetieren oder Fangnetzen – oder verlangen es sogar. Ansprüche auf staatliche Leistungen, zum Beispiel auf Renten, können dem Status von Eigentumsrechten zumindest sehr nahekommen. Die Institution des Eigentums war historisch schon immer großen Veränderungen unterworfen.

Es fragt sich, ob das beim Patentrecht anders ist oder ob hier nicht vielmehr etwas Falsches zum Sündenbock gemacht wird. Patentrichtlinien, Gesetze, Patentgerichte und Beschwerdekammern müssen sicherstellen, dass es sich bei Patenten um wirkliche Erfindungen handelt und dass ihre mögliche Verwertung nicht gegen die guten Sitten verstößt.

Außerdem

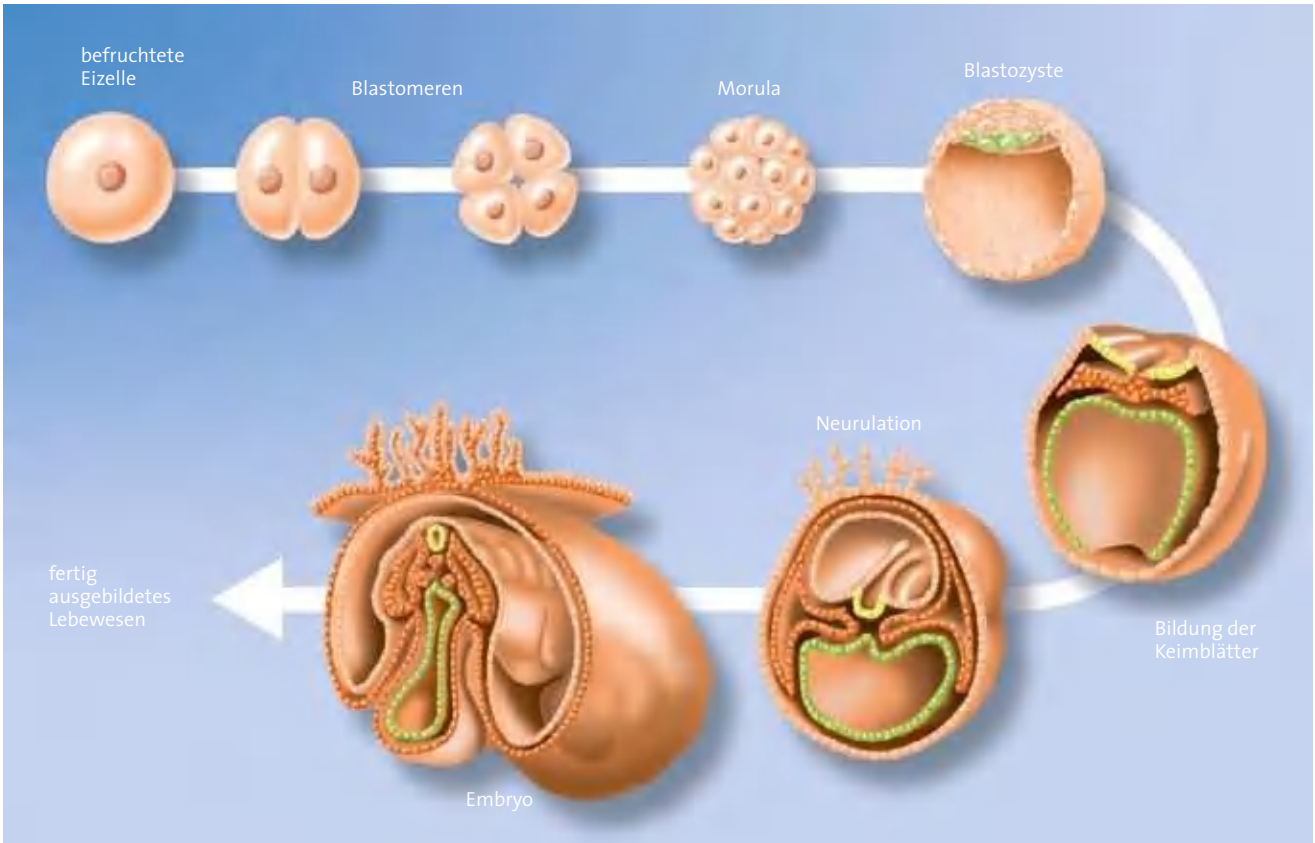
- muss es sich um Verfahren handeln, die so in der Natur nicht vorkommen;
- dürfen sie nicht Teile der allen zugänglichen Natur, zum Beispiel Arten oder Genome, dem Gebrauch aller entziehen;
- dürfen die Verfahren selbst und ihre kommerzielle Verwertung nicht gegen Rechte der Menschen oder rechtlich geschützte Ansprüche anderer Lebewesen verstoßen.

Kein Handel mit Körpermaterial

Zu all diesen Fragen gibt es eine Fülle von Einspruchs- und richterlichen Prüfungsmöglichkeiten. Lebendiges wird aber nicht allein dadurch zum »Material« oder zur »Sache« – im Sinne eines »toten« Objekts –, indem es zum Gegenstand von Eigentums- oder Patentansprüchen wird. »Ausgangsmaterial« oder »Sache« ist hier keine Kategorie von Gegenständen, sondern betrifft nur Verfügungsrechte. Der Eigentümer eines Tiers darf andere von bestimmten Arten des Umgangs damit ausschließen, er behandelt es aber nicht per se als »toten Gegenstand«. Die Verwendung einer Sache als »Material eines Verwertungsprozesses« wäre nur dann ethisch oder rechtlich anstößig, wenn ihr Verändern und Verkaufen gegen Gewinn an sich schon anstößig wäre. Eine prinzipielle Verurteilung von »Kommerz« ist jedoch weder mit individuellen Freiheitsrechten noch mit sozialem Nutzen vereinbar.

Wie steht es nun mit der Patentierbarkeit von Verfahren mit menschlichem Körpermaterial? Auch hier ist aus der Sicht der heutigen Philosophie klar, dass die Rechte der Menschen auf körperliche Integrität und Freiheit von Zwang, der von Privatpersonen ausgeht, nicht verletzt werden dürfen. Der legitime Anspruch auf Durchsetzung von Gesetzen hat grund- und menschenrechtliche Grenzen, etwa im Folterverbot. Zum moralischen Konsens der meisten gegenwärtigen Gesellschaften gehört auch, dass es keinen Handel mit Körperteilen geben darf. Selbst wenn deren Veräußerung freiwillig sein kann, geht ihr in aller Regel doch eine unverschuldete Zwangssituation voraus. Eine Selbstverstümmelung aus reinem Gewinninteresse kann nicht nur zu Missbrauch führen. Die Integrität des menschlichen Körpers ist auch für sich genommen ein hohes Gut.

Wie sieht es dann mit menschlichen Stammzellen aus? Es gibt bekanntlich verschiedene Arten, je nach Herkunft und Erzeugung. Ethisch und rechtlich relevant ist vor allem der Unterschied zwischen solchen, die auf freiwillig und ohne erhebliche Schädigung des Körpers gespendete Zellen zurückgehen, und solchen, die der Zerstörung eines frühen Embryos im Stadium vor der Einnistung in den mütterlichen Körper entstammen. Zu Ersteren gehören die so genannten adulten Stammzellen und die reprogrammierten oder induzierten pluripotenten Stammzellen (iPS-Zellen,



Aus der befruchteten Eizelle entwickeln sich bei Säugetieren durch erste Zellteilungen Blastomeren. Sie bilden nach einigen Tagen die Morula. Anschließend entsteht durch erste Differenzierung zwischen inneren und äußeren Zellen der Morula die Blastozyste (»Bläschen«), aus der schließlich der Embryo hervorgeht.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ART FOR SCIENCE

siehe Glossar S. 30), zu Letzteren vor allem die embryonalen Stammzellen.

Während adulte Stammzellen allenfalls mulitpotent sind (sich in mehrere Zellarten differenzieren können), sind embryonale Stammzellen pluripotent, das heißt, sie können sich in alle Gewebearten außer dem Nährgewebe entwickeln, daher auch nicht in ein ganzes menschliches Individuum (Totipotenz). Im natürlichen Verlauf verlieren die embryonalen Zellen unwiederbringlich ihre Pluripotenz. Durch technische Maßnahmen kann diese Entwicklung umgekehrt werden und bereits spezialisierten Zellen ihr ursprüngliches Potenzial wiedergegeben werden. Dann handelt es sich um induzierte pluripotente Zellen. Totipotent sind solche Zellen aber ebenfalls nicht, wie Versuche bei Mäusen zeigten.

Die Zellen, die in der Forschung an embryonalen Stammzellen benutzt werden, sind pluripotent, also selbst keine Embryonen – Embryo im Sinne des deutschen Embryonenschutzgesetzes, auf das sich auch der EuGH beruft, ist »jede totipotente Zelle«. Strittig ist die Herkunft dieser Zellen aus Embryonen, die im Zusammenhang mit künstlicher Befruchtung entstanden, aber endgültig nicht mehr einer Frau eingepflanzt werden. In etlichen, auch europäischen Ländern dürfen solche Embryonen vor ihrer Zerstörung (beziehungsweise »Entsorgung«) zur Gewinnung von embryonalen Stammzellen verwendet werden.

Menschenwürde ab der Befruchtung?

In dieser Frage herrscht keine Einigkeit, weder unter Gesetzgebern noch unter Ethikern, nicht einmal unter Theologen. Es gibt zwei dominierende Positionen. Die eine kann man eine *absolute* nennen, nach der mit der Befruchtung einer Eizelle oder der Herstellung einer totipotenten Zelle auf anderem Weg – zum Beispiel Transfer eines Zellkerns in eine entkernte Eizelle – der Status einer menschlichen Person mit voller Menschenwürde und Lebensschutzrechten beginnt. Die andere ist eine graduelle Position, der zufolge den Stadien der Embryonalentwicklung unterschiedliche Rechte zustehen, die jedoch – einmal gewährt – nicht mehr reversibel sind.

Die Fülle der subtilen Argumente, die für beide Seiten ins Feld geführt werden, lassen sich hier nicht wiedergeben. Klar ist aber, dass die Debatte nicht naturwissenschaftlich entschieden werden kann. Denn das biologische Entwicklungspotenzial selbst ist ein natürliches Faktum – weder Wert noch Norm. Normen können jedoch aus Fakten nicht logisch

Der Europäische Gerichtshof in Luxemburg ist das oberste Rechtsprechungsorgan der EU. Letztes Jahr erregte er Aufsehen mit seinem Verbot der Patentierung von Verfahren mit embryonalen Stammzellen.

DPA / THOMAS FREY

gefolgert werden. Irgendwo in der Argumentation muss eine bewusste Wertung ausgesprochen werden, die sich zwar den Fakten plausibel zuordnen lässt, wie es etwa bei den Rechten zum Wählen oder zum Führen eines Fahrzeugs geschieht, aber eben nicht rein naturwissenschaftlich oder logisch begründet ist. Wenn in einem biologischen Potenzial jedoch keine normative Bestimmung dazu vorliegt, was aus einer Zelle werden soll, dann kann man verschiedenen Entwicklungsstadien auch unterschiedliche Rechte zuschreiben – wie das ja auch in den meisten Ländern etwa in der Gesetzgebung zum Schwangerschaftsabbruch geschehen ist.

Der biologische Begriff, dem der Europäische Gerichtshof die entscheidenden rechtlichen Konsequenzen zuordnet, ist die erwähnte Totipotenz. Eine Zelle oder ein Zellverband, der sich unter »geeigneten Bedingungen« zu einem ganzen Menschen entwickeln kann, soll Menschenwürde und Lebensschutz genießen. Was unter heutigen technischen Voraussetzungen »geeignete Bedingungen« darstellt, ist allerdings alles andere als klar. Mit der Technik der Reprogrammierung und anderen Verfahren (wie die so genannte tetraploide Komplementierung, siehe Glossar S. 30) ist es sogar prinzipiell möglich, aus jeder menschlichen Zelle ein ganzes Individuum zu entwickeln.

Andererseits liegt die Chance natürlicher befruchteter Eizellen, sich ohne technische Hilfe im weiblichen Uterus einzunisten, unter 50 Prozent. Mit anderen Worten: Das Potenzial einer Zelle oder eines Zellverbands, sich zu einem ganzen Individuum zu entwickeln, hängt heute entscheidend von menschlichen Handlungen und ihren Zwecken ab. Nach einer Implantation darf es zweifellos nur noch um die Mutter und das zukünftige Kind gehen. Das Gleiche muss aber nicht für das Stadium davor gelten. Wenn es rechtlich nicht mehr möglich ist, einen Embryo in einen Uterus einzupflanzen, kann ihm auch kein Lebensrecht garantiert werden. Selbst ein Austragen der überzähligen befruchteten Eizellen durch Leihmütter lässt sich dann nicht erzwingen.

Das viel beschworene Potenzialitätsargument kann sicher verschieden verstanden werden. Ob es angesichts der Entwicklung der Technik auf die Dauer die normative Last tragen kann, die ihm viele Gesetzgeber und Richter aufbürden, kann man bezweifeln. Graduelle Konzeptionen, die einem eingepflanzten Embryo höhere Rechte zuschreiben als einer totipotenten Zelle in der Petrischale, sind meines Erachtens daher alles andere als abwegig. Auch braucht niemand zu befürchten, dass sie das Schutzniveau für geborene, behinderte oder sterbende Menschen unterhöhlten: Wie gesagt sind die Schutzrechte, die man jeder Entwicklungsstufe zuschreibt, irreversibel (was natürlich für aktive Rechte, die aus der Mündigkeit folgen, nicht gilt).

Die Debatte um die Würde und die Rechte frühen menschlichen Lebens wird also weitergehen. Sie lässt sich nicht durch ein Gerichtsurteil beenden, auch nicht durch eines des höchsten europäischen Gerichts. Die Stammzellforschung wird wohl zunächst ihre größten Möglichkeiten in der Krankheitsursachen- und Arzneimittelforschung haben – dabei wird man in einer zumindest teilweise marktwirtschaftlichen Medizin nicht ohne Patente auskommen. Gründe für ein prinzipielles Verbot von Patenten auf Verfahren mit menschlichen Zellen sind kaum erkennbar.

Wenn man allerdings für jedes mit patentierten Verfahren herstellbare Produkt menschliche Embryonen erzeugen und zerstören müsste, wären wohl die guten Sitten selbst in den Augen von Gradualisten (für mich die plausiblere Position) verletzt. Bei dem Gebrauch von Zellen aus Zelllinien, die vor langer Zeit aus Frühembryonen ohne Lebenschancen abgeleitet wurden, muss das jedoch nicht gelten. Stammzellforschung soll zu medizinischen Anwendungen führen, die wahrscheinlich nicht gänzlich ohne Patente zu haben sind. »Causa finita« wird man nach dem Urteil also noch lange nicht sagen können. ~

DER AUTOR

Ludwig Siep ist Professor für Philosophie an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster. Seine Forschungsschwerpunkte sind Bioethik, Medizinethik, praktische Philosophie sowie die Geschichte des Deutschen Idealismus.

QUELLEN

Europäische Gruppe für Ethik der Naturwissenschaften und der Neuen Technologien: Ethische Aspekte der Forschung und Verwendung menschlicher Stammzellen: Der Text von der Stellungnahme. Dictus Publishing, 248 S., Europäische Kommission 2011

Kempermann, G.: Neue Zellen braucht der Mensch: Die Stammzellforschung und die Revolution der Medizin. Piper, München 2008

Plomer, A., Torremans, P.: Embryonic Stem Cell Patents: European Patent Law and Ethics. Oxford University Press, Oxford 2010

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1155289**

GENTECHNOLOGIE

Moskitos mit Selbstmordgen

DAVID LITTSCHWAGER

Stechmücken mit fremden Genen sollen ganze Populationen ihrer Art vernichten und so eine der verheerendsten Krankheiten unserer Zeit eindämmen: das rasant um sich greifende Denguefieber. In Käfigen funktioniert die Strategie bereits. Dass aber vereinzelt schon transgene Moskitos ausgesetzt wurden, halten selbst viele Forscher für vorschnell.

Von Bijal P. Trivedi

Hinter dem kleinen Ort Rio Florido wird die Straße, die durch Soja-, Kakao-, Bananen- und Mangoplantagen führt, zu einem kurvenreichen, holprigen Schlammweg und endet schließlich vor einer bewachten Sperre. Wir befinden uns ganz im Südosten Mexikos nahe der Grenze zu Guatemala bei der Stadt Tapachula. Die Anlage ist mit Stacheldraht umzäunt. Auf einem Warnschild sind ein Mann und eine Frau abgebildet, zwischen ihnen eine Stechmücke. Auf Spanisch steht darauf, dass hier genetisch modifizierte Moskitos gehalten werden, deren Handhabung spezielle Vorsichtsmaßnahmen erfordert. Der Posten lässt uns durch das Tor.

Drinnen beschatten Cashewbäume eine Plattform voller großer Käfige, die mit Gaze verhüllt sind (siehe Bild S. 37).

AUF EINEN BLICK

GENETISCHER ANGRIFF AUF DENGUEFIEBERMÜCKEN

1 Wissenschaftler haben den Hauptüberträger des **Denguefiebervirus**, die **Stechmücke *Aedes aegypti***, derart genetisch verändert, dass sich die Weibchen der Folgegenerationen nicht mehr fortpflanzen, wohl aber die transgenen Männchen. Eine so unterwanderte Insektenpopulation sollte untergehen.

2 Einige Forscher erproben das Verfahren jetzt in streng abgeschlossenen Behältnissen in Denguefiebergebieten an Wildpopulationen. Andere wagten bereits die Freisetzung solcher **transgenen Moskitos**.

3 Das nicht angekündigte Vorpreschen mancher Kollegen ist unter Wissenschaftlern, **Seuchenbekämpfern und Ökologen** umstritten.

In ihnen tummeln sich Unmengen Gelbfiebermücken, auch Ägyptische Tigermücken genannt. Wissenschaftlich heißt diese Moskitoart heute meist *Stegomyia aegypti*, aber viele sprechen noch wie früher von *Aedes aegypti*. Diese kleinen, kaum hörbaren Mücken sind besonders in den Tropen und Subtropen weit verbreitet und gelten als Hauptüberträger des Denguevirus.

Hier in Südmexiko gehört die Spezies zu den vorherrschenden Stechmücken. In der Versuchsanlage werden genetisch veränderte (»transgene«) Männchen darauf angesetzt, sich mit normalen Weibchen der lokalen Population zu paaren. Die neuen Gene sollen die weibliche Nachkommenschaft außer Gefecht setzen – ein Trick, mit dem sich womöglich das Denguefieber ausrotten ließe und damit eine der problematischsten und schwersten Infektionskrankheiten, deren Häufigkeit derzeit sehr schnell zunimmt. Gelbfiebermücken sind zwar nicht die einzigen, aber die Hauptüberträger dieser bedrohlichen Seuche.

Weltweit infizieren sich inzwischen pro Jahr schätzungsweise rund 100 Millionen Menschen mit Dengueviren, genauer gesagt mit einem von vier eng verwandten Serotypen. In manchem ähneln die Symptome denen einer Virusgrippe. Typisch sind aber neben hohem Fieber, Kopfschmerzen und Übelkeit unter anderem auch Hautausschläge sowie sehr starke Gelenk- und Muskelschmerzen bis hin zu Krämpfen und Bewegungsstörungen. Lebensbedrohlich wird es, wenn innere Blutungen und Hautblutungen oder ein Kreislaufschock auftreten, was besonders bei einer Zweitinfektion mit einem anderen Serotyp vorkommt.

Noch gibt es gegen Dengueviren keine Impfung und keine spezifischen Medikamente. Gegenmaßnahmen beschränken

sich auf die Eindämmung der Mückenbestände etwa mit Insektiziden sowie die übliche Vorbeugung gegen Moskitostiche, zum Beispiel mit Repellents oder schützender, teilweise auch imprägnierter Kleidung und speziell besprühten dichten Netzen. Vorwiegend stechen die winzigen Biester tagsüber und in der Dämmerung. Ihre Larven gedeihen in jeder kleinsten Wasserpfütze, ob in alten Autoreifen, an Pflanzen oder in Vasen, in Dachrinnen oder zwischen Müll. Dort überstehen die Insekteneier sogar lange Trockenphasen. Deswegen gehört zu den vordringlichen Maßnahmen, alle Gefäße dicht abzudecken und jegliches offene Wasser zu vermeiden.

Eine offensivere Strategie verfolgt der Molekularbiologe Anthony A. James von der University of California in Irvine, dessen streng abgeschirmte Feldstation wir hier in Südmexiko besuchen. Er und seine Kollegen haben Gelbfiebermücken Gene verpasst, mit denen neue Mückenweibchen keine funktionsfähige Flugmuskulatur mehr entwickeln und bald nach dem Schlüpfen eingehen, während die männlichen Nachkommen unbeeinträchtigt bleiben. Nur die Weibchen saugen Blut, können sich aber nun nicht mehr paaren und nicht stechen, während sich die Männchen der nächsten Generationen fleißig sexuell betätigen und dabei die tödliche Genfracht verbreiten. Damit sollte die betreffende Population bald zusammenbrechen. Dass dies funktionieren kann, haben bereits Laborversuche an der Colorado State University in Fort Collins erwiesen, die Megan Wise de Valdez durchführte, eine Mitarbeiterin von James. Als man zu normalen Gelbfiebermücken transgene Männchen setzte, gingen die Bestände in den Käfigen binnen fünf Monaten zu Grunde. Nun soll sich das Verfahren in Südmexiko im Freien zunächst in großen verschlossenen Behältnissen gegen die dortigen Mücken bewähren.

Wenn die Studie erfolgreich verläuft, könnte man solcherart veränderte Moskitos massenweise in Dengue-Endemiegebieten freisetzen und mit ihrer Hilfe die Plagegeister dezimieren. Noch warnen manche Experten allerdings vor unabsehbaren Folgen für die Natur. Die Forscher sind sich bisher

Wichtigste Überträgerin des Denguefiebers ist die inzwischen weit verbreitete Ägyptische Tigermücke *Aedes aegypti* (oder *Stegomyia aegypti*), die auch Gelbfiebermücke heißt.

AG. FOCUS / SCIENCE PHOTO LIBRARY / MARTIN DOHRN

nicht einig, welche Maßstäbe und Kriterien sie dazu ansetzen sollten. Denn für Tests an und den Umgang mit transgenen Organismen existieren auf internationaler Ebene noch keine übergreifend verantwortlichen Organisationen oder allgemein verbindlichen Gesetze. Im Grund können Wissenschaftler und Unternehmen auf dem Gebiet tun, was sie für richtig und zweckmäßig halten. Sogar eine unkontrollierte Freisetzung transgener Insekten zu Testzwecken ist in manchen Drittweltländern möglich, und das, ohne die Menschen vor Ort davon in Kenntnis zu setzen, geschweige denn ihr Einverständnis einzuholen.

James bemüht sich bei seinem Projekt um möglichst viel Öffentlichkeitsarbeit. Dafür scheuen er und seine Mitarbeiter seit Jahren weder Zeit noch Aufwand. Beispielsweise erwarben sie das Stück Land für die abgeschottete Versuchsstation nach Verhandlungen mit den kommunalen Verantwortlichen von Tapachula über das dortige traditionelle Verteilungssystem. Über die laufenden Studien und zukünftigen Vorhaben informieren sie die Bevölkerung in Veranstaltungen und Diskussionen. Dieser Wissenschaftlergruppe ist es besonders wichtig, die transgenen Insekten zunächst zwar unter freilandnahen Bedingungen, aber hermetisch abgeschirmt zu prüfen.

Sein früherer Forschungskollege Luke Alphey, Gründer des in Großbritannien ansässigen Biotechnologieunternehmens Oxitec, schuf dagegen zum Schrecken der Fachwelt gleich vollendete Tatsachen: In den Jahren 2009 und 2010 ließ seine Firma auf der nordwestlich von Jamaika gelegenen Karibikinsel Grand Cayman Millionen von gentechnisch veränderten Gelbfiebermücken frei. Davon erfuhren James und viele andere Experten erst 2010 auf einem Fachkongress in Atlanta – als die Studie auf den Kaimaninseln schon 14 Monate lief und Alphey sie vorstellte. Seitdem führte Oxitec Freisetzungen auch in Malaysia und in Brasilien durch.

Fachleute fürchten, das forsche Vorpreschen könnte der gesamten Arbeit mit transgenen Insekten schaden und man würde Ähnliches erleben wie mit gentechnisch modifizierten Nutzpflanzen in Europa. Schlimmstenfalls würde die neue Technologie ausgebootet, bevor ihr Potenzial und mögliche Auswirkungen auf die Natur überhaupt ausgelotet sind. Denn obwohl der Ansatz bisher Erfolg versprechend aussieht und die Labortests günstig verliefen, erscheint es vielen Experten unbedingt geboten, das Verfahren zuerst unter freilandnahen, aber sicheren Bedingungen in den Tropen und Subtropen akribisch zu prüfen. Schließlich würden die transgenen Moskitos später einmal den Dschungel erobern.

»Viele Fachkollegen erfuhren von der **Freisetzung auf den Kaimaninseln** erst, als die Studie schon 14 Monate lief«

James zählt zu den Pionieren für Molekulargenetik von Stechmücken. Als einer der Ersten hatte er ein Moskitogen kloniert, also außerhalb des Insekts vervielfältigt, und Stechmücken gentechnisch manipuliert. Im Jahr 2001 beschloss er, dieses Spezialwissen zur Bekämpfung von durch Insekten übertragene Tropenkrankheiten einzusetzen. Er wollte versuchen, für Pflanzenschädlinge entwickelte Methoden bei Mücken zu verwenden, die für Menschen gefährlich sind.

Damals hatte Alphey, noch an der University of Oxford, bei *Drosophila*-Taufliegen ein Verfahren zur Erzeugung von transgenen Fliegen entwickelt, bei dem die Weibchen selektiv früh verenden. Letztlich handelt es sich dabei um eine moderne – gentechnologische – Version der jahrzehntealten, durchaus erfolgreichen Methode, Schadinsekten von Nutzpflanzen durch Aussetzen steriler Männchen zu dezimieren. Früher hat man Unmengen dieser Tiere im Labor herangezüchtet, die Männchen aussortiert und durch Bestrahlen unfruchtbar gemacht. Ließ man sie anschließend draußen in Überzahl auf die Weibchen los, verdrängten sie die fruchtbaren Männchen bei der Begattung. Oft brach der Bestand mangels Nachkommen schon nach wenigen Freisetzungen zusammen – was sich unter anderem 1977 in Tapachula gegen die Mittelmeerfruchtfliege *(Ceratitis capitata)* bewährte, einen bedeutenden Pflanzenschädling.

Für Stechmücken eignet sich solches Bestrahlen allerdings schlecht. Es schwächt die Männchen so sehr, dass sie schon beim Aussortieren oder spätestens auf dem Transport sterben. Doch Alpheys neue Methode ließ sich auf Moskitos übertragen. Hierbei wird eine Genomregion genutzt, die nur die Weibchen benötigen. Außerdem identifizierten James und Alphey 2002 einen genetischen Schalter für die Flugmuskelentwicklung. Sie zeigten, dass Weibchen, bei denen er abgestellt wird und die deswegen keine Flugmuskeln entwickeln, keine Männchen anlocken. Folglich sollten entsprechend ausgestattete Moskitoweibchen harmlos sein.

Um das Verfahren sowie weitere ähnlich aufgebaute Eingriffe kommerziell zu verwerten, gründete Alphey 2002 die Firma Oxitec. Als James 2005 von der Stiftung der amerikanischen National Institutes of Health – die weit gehend von der Bill & Melinda Gates Foundation getragen wird – für

MIT FRDL. GEN. VON BIJAL P. TRIVEDI

Feldstation in Mexiko: Hier werden gentechnisch veränderte Moskitomännchen streng abgeschirmt auf normale Mückenschwärme aus der Region losgelassen – genau gesagt auf die Weibchen. Durch Begattung sollen die Käfigpopulationen nach einiger Zeit kollabieren, was sich die Forscher später ebenfalls für die Bestände in der Natur erhoffen.

Tests gentechnischer Strategien zur Bekämpfung des Denguefiebers 20 Millionen US-Dollar bekam, reichte er 5 Millionen an Oxitec weiter, damit die Firma solche transgenen Moskitos konstruierte.

Angriff auf die Flugmuskeln mit einer Kaskade genetischer Schalter

Mitarbeiter entwarfen nun eine DNA-Kassette mit fünf Genen und zugehörigen regulatorischen Elementen, damit die neuen Gene jeweils zum gewünschten Zeitpunkt an- und abgeschaltet werden. Das System funktioniert als Kaskade: Während der Metamorphose von der Larve zur Mücke, also in der Puppe, aktiviert der geschlechtsspezifische Schalter bei den Weibchen das erste Gen. Daraufhin entsteht ein Protein, welches den Schalter für ein zweites Gen anwirft. Und dieses kodiert für ein Toxin, das die Flugmuskulatur zerstört. Damit die Forscher den Überblick behalten, ob die Tiere diese Gene aufweisen, fügten sie außerdem DNA-Sequenzen für rot und grün fluoreszierende Proteine hinzu.

Allerdings dürfen die transgenen Moskitoweibchen zunächst nicht gleich sterben, sondern müssen erst einmal Unmengen von Eiern legen, weil man viele transgene Männchen braucht. Der Trick ist, die Genkaskade über einen weiteren Schalter mittels eines »Gegengifts«, in diesem Fall des Antibiotikums Tetracyclin, zu blockieren, das man dem Wasser zusetzt, in dem die Larven leben. Nun kann das Toxin nicht gebildet werden. Dies ist zudem eine Sicherheitsmaßnahme, damit womöglich doch freikommende transgene Moskitoweibchen keine reproduktionsfähigen weiblichen Nachkommen produzieren – unter natürlichen Bedingungen leben die Larven nicht in antibiotikahaltigem Wasser.

In weiten Teilen Mexikos, auch in Tapachula, gehört das Denguefieber seit Langem zu den gewichtigsten Gesundheitsgefahren. Fatal sind die geradezu explosionsartigen Ausbrüche, die sich in dicht besiedelten Gebieten besonders verheerend auswirken. 2009 und 2010 war zum Beispiel Tapachulas Vorort Pobres Unidos (»Vereinigte Arme«) sehr stark heimgesucht. Der Epidemiologe Rogelio Danis-Lozano und die Parasitologin Janine Ramsey, die auf James' Station die tägliche Arbeit leitet, zeigen mir das Armutsviertel.

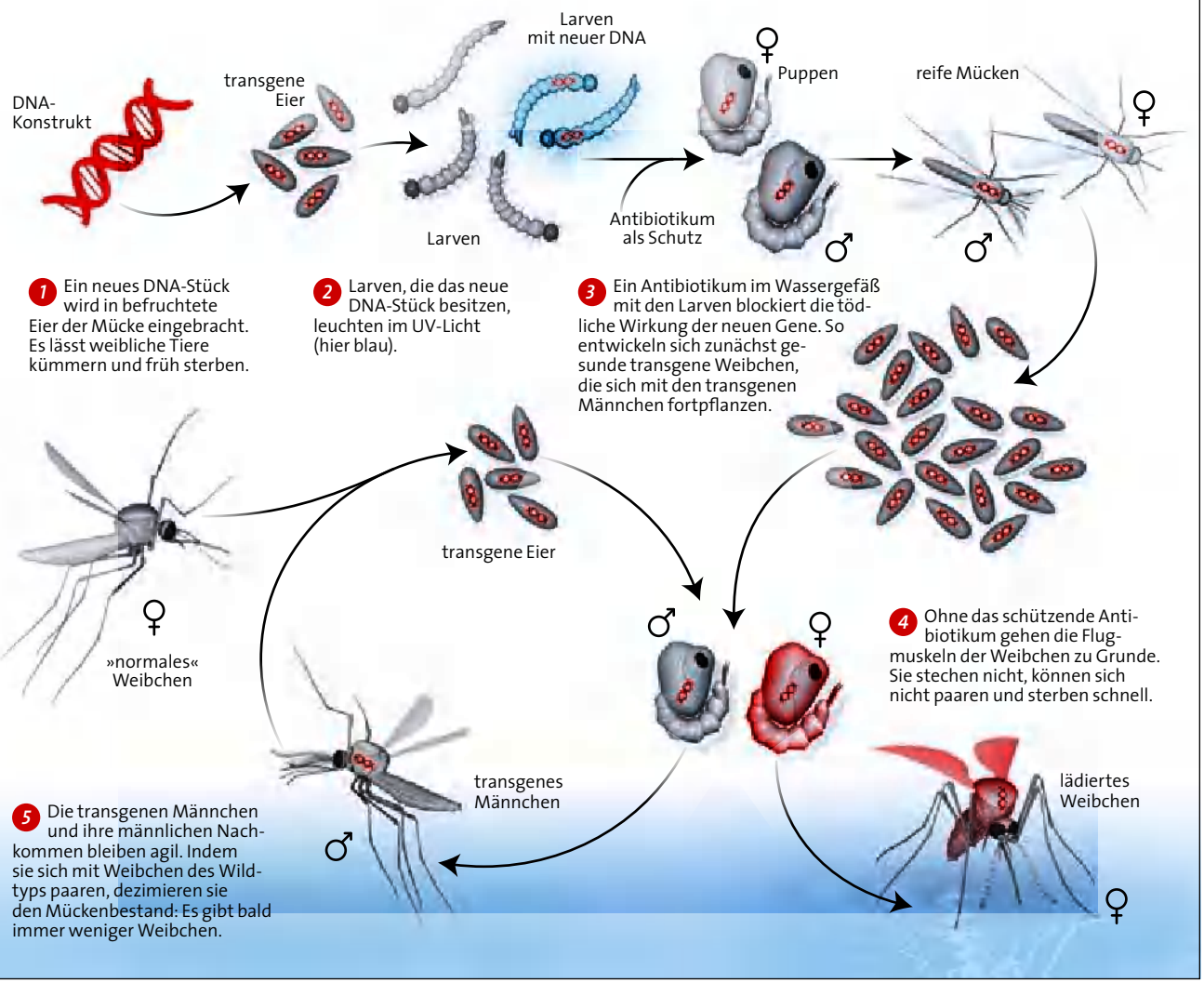
Fast alle Häuser haben keine Vorderwand, so dass Moskitos frei hineinfliegen können. Der nasse Erdboden und die feuchte Luft im Innern ziehen die Insekten geradezu an. Überall gibt es Müllberge und vielerlei Behältnisse, wo sich Regenwasser sammelt – ideale Mückenbrutstätten. Danis-Lozano macht uns auf eine randvolle, große, gelbe Wanne aufmerksam. Darin schwimmen Unmassen dünner, schwarzer Würmchen zuckend umher. Die Besitzerin ahnt nicht, dass in ihrem Waschzuber Moskitolarven heranwachsen, obwohl sie das Denguefieber natürlich kennt.

Solche Verhältnisse sind typisch für viele Denguefiebergebiete der Welt. In über 100 tropischen und subtropischen Ländern Amerikas, Asiens und Afrikas ist die Krankheit verbreitet, und sie greift immer weiter um sich. Seit den 1970er Jahren hat sich die Zahl der Fälle alle zehn Jahre verdoppelt. Zum einen durch den wachsenden internationalen Reise- und Warenverkehr, zum anderen, weil Menschen zunehmend in Ballungsgebiete ziehen, werden die Ausbrüche immer häufiger und heftiger. Das Denguefieber sei eine der aggressivsten wiederkehrenden Infektionskrankheiten, schrieben 2008 die amerikanischen Epidemiologen David M. Morens und Anthony S. Fauci vom National Institute of Allergy and Infectious Diseases in Bethesda (Maryland). Bei der hämorrhagischen Verlaufsform stirbt unbehandelt bis zu jeder Fünfte. Intensivmedizinische Maßnahmen können die Sterberate zwar auf ein Prozent senken, aber dieses Virus fordert dennoch weltweit mehr Todesopfer als die übrigen hämorrhagischen Viruserkrankungen zusammen, eingeschlossen das Ebola- und Marburgfieber.

Einer der Gründe, weswegen sich James dem Denguefieber zuwandte und nicht beispielsweise der Malaria, ist die Beteiligung nur sehr weniger Moskitoarten – während ungefähr drei Dutzend Mückenspezies den Malariaerreger weitergeben können. Die Gelbfiebermücke und Hauptüberträgerin stammt ursprünglich aus Afrika und war dort anscheinend früher ein Insekt in den Wäldern, das irgendwann den Menschen zu seinem Hauptwirt auserkor. Mit Sklavenschiffen gelangte das Tier schon vor rund 400 Jahren nach Amerika und breitete sich dort rasch aus. Heute vermehren sich diese Stechmücken als Kulturfolger in jeder kleinen Kuhle mit ein

Todesschalter für Weibchen

Ein transgener Stamm der Gelbfiebermücke bringt stark behinderte Weibchen hervor, die nicht fliegen können, sich nicht paaren und nicht stechen. Die Männchen – die kein Blut saugen – verbreiten diese genetische Ausstattung.



EMILY COOPER

paar Schluck Wasser. Erwachsene Weibchen leben ungefähr einen Monat. Weil sie fast ausschließlich Menschen stechen, bleibt ihnen somit viel Zeit und Gelegenheit, das Virus mit einer Blutmahlzeit aufzunehmen und weiterzugeben.

Diese tagaktiven Moskitos fliegen so leise, dass ich von dem Schwarm in dem kleinen Anzuchtkäfig fast nichts höre, den mir die Entomologin Laura Valerio von der University of California in Davis zeigt. Wir sind in Tapachula im abgesicherten Insektarium des Gesundheitsforschungszentrums. Die Forscherin zieht einen Handschuh an, um in den Käfig hineinzulangen und auf eines der transgenen Weibchen zu deuten. Während die Männchen aufgescheucht umherschwirren, bleiben die Weibchen sitzen oder hüpfen höchstens träge ein kleines Stück weg – Resultat der zerstörten Flugmuskeln.

»Vielleicht erfährt kein Forschungszweig mehr **eingebildeten oder wirklichen Missbrauch** als das Gebiet der transgenen Organismen«

Von hier werden transgene Moskitolarven zur Feldversuchsstation gebracht. Dort gibt es fünf Käfigpaare: jeweils einen zur Kontrolle mit normalen Mücken der Region und einen, in dem sich normale und transgene Mücken begegnen. Um an die Gehege heranzukommen, müssen sich die Leute durch eine Anzahl dichter Netze vorarbeiten. Man möchte in jeder Hinsicht Fehler der Vergangenheit vermeiden.

Einst war es für Industrienationen vor allem bequem, ihre Studien mit gentechnisch veränderten Organismen in Entwicklungsländern durchzuführen. Mit der Zeit provozierte die nonchalante Haltung gegenüber der dortigen Umwelt allerdings Widerstand in der Bevölkerung, der ganze Forschungsprogramme scheitern ließ. Vielleicht erfährt kein Wissenschaftszweig mehr eingebildeten oder wirklichen Missbrauch als das Gebiet der transgenen Organismen.

Indien liefert dafür ein Beispiel. 1969 beschlossen die Weltgesundheitsorganisation WHO und die indische Regierung, gemeinsam Strategien zu erforschen, um drei wichtige Moskitoarten mit Hilfe von gentechnischer Manipulation zu kontrollieren. Ins Programm kamen eine Malariamücke, eine *Culex*-Mücke, die durch Fadenwürmer Lymphschwellungen – Elephantiasis – hervorruft und die Gelbfiebermücke. Zu den Geldgebern gehörte auch die US-Regierung.

1972 schrieb jemand anonym in der indischen Zeitung »National Herald«, Forscher hätten in dörflichen Brunnen Mückenlarven ausgesetzt, die mit einem gebräuchlichen Krebsmittel behandelt worden waren, das bei Tieren Geburtsschäden und Krebs hervorruft. Die verantwortlichen Wissenschaftler verfassten eine Gegendarstellung, wollten allerdings keine Interviews geben. Zwei Jahre später brachte die indische Nachrichtenagentur Press Trust eine Meldung mit dem Titel »WHO betreibt in Indien Geheimforschung für die USA«. Darin hieß es, in dem Moskitoprojekt würde die Eignung von Gelbfiebermücken zur biologischen Kriegsführung geprüft. Man teste Chemikalien und Methoden, die in den Geldgeberländern nicht erlaubt sind. Die Eier von *Aedes aegypti* könne man – im Gegensatz zu denen anderer Arten – getrocknet in einem Briefumschlag verschicken. Zwar wiesen die Forscher diese Anschuldigungen entschieden zurück. Doch das mediale Spektakel war so groß, dass die WHO das Programm schließlich aufgab.

Seitdem graut es vielen Wissenschaftlern vor Feldstudien mit gentechnisch veränderten Organismen, erklärt Stephanie James, Leiterin der Initiative Grand Challenges in Global Health von der Stiftung der National Institutes of Health – nicht verwandt mit Anthony James. »Die psychische Hürde war enorm. Man wusste, man durfte sich keinen Fehler leisten.«

Auch Anthony James erzählt: »Alle meinten immer nur, es würde mir nie gelingen, eine Bevölkerung für mein Vorhaben zu gewinnen.« Er suchte Rat bei einem Experten für Öffentlichkeitsarbeit: Jim Lavery, der am Center for Global Health Research am St. Michael's Hospital in Toronto untersucht, wie man die Menschen bei Forschungsprojekten einbeziehen kann.

Laverys Empfehlung: eine Region wählen, die stark unter Denguefieber leidet und wo man das Problem trotz aller Anstrengungen bisher nicht in den Griff bekommt. Es sollte außerdem ein Land mit hoch entwickelten Strukturen und stringenten Vorschriften sein, dessen Behörden die Risiken und Vorteile solch eines Projekts abschätzen können. So müssten die Menschen nicht befürchten, dass man sie übervorteilt oder gefährdet. Mit Hilfe von Lavery und dem langjährigen Experten für Moskitofeldforschung Thomas Scott von der University of California in Davis brachte James nun ein international zusammengewürfeltes Team von Moskitoökologen, Anthropologen und Ethikern zusammen.

Erfolg mit Öffentlichkeitsarbeit

2006 erkoren die Forscher Tapachula zum Favoriten für eine Versuchsstation. Mexiko besaß Gesetze zu genetisch veränderten Organismen. Das Land hatte auch das Cartagena-Protokoll zur biologischen Sicherheit unterzeichnet – das seit 2003 gültige internationale Abkommen zum Umgang mit transgenen Organismen und auch deren Import. Und wegen der guten Erfahrungen in Tapachula mit der Ausrottung der Mittelmeerfruchtfliege würde die Bevölkerung beim Gedanken an ein gentechnisch manipuliertes Insekt nicht gleich in Panik geraten.

»Zuerst kam uns das komisch vor, dass diese Forscher Land haben wollten«, erinnert sich Martimiano Barrios Matute, Vorsteher der betroffenen Gemeinde. Wieso wollte jemand große Käfige bauen, nur um eine Menge veränderte Mücken hineinzutun? Und was würde passieren, wenn einige davon freikämen? Könnten sie den Menschen oder ihren Feldern schaden? Oder würden dann auch andere Insekten steril?

James und seine Mitarbeiter redeten mit den Leuten, gingen auf die verschiedenen Bedenken ein und erklärten ihr

Denguefieber: Die Hauptverbreitungsgebiete

Von den durch Moskitos übertragenen Viruskrankheiten nimmt das Denguefieber bei Weitem am schnellsten zu. Rund zweieinhalb Milliarden Menschen leben in den tropischen und subtropischen Hauptrisikogebieten. In den letzten Jahrzehnten verzeichnete die Weltgesundheitsorganisation alle zehn Jahre eine Verdopplung der Erkrankungen. Nach Angaben von Forschern konnten freigesetzte transgene Mücken lokale Mückenpopulationen drastisch vermindern.

Gelegentlich übertragen Moskitos das Denguevirus auch in Südeuropa. In Deutschland stieg zwar die Anzahl der Erkrankungen auf mehrere hundert pro Jahr – allerdings haben sich die Betroffenen bisher alle in anderen Ländern angesteckt.

GEORGE RETSECK; DENGUEFIEBER-RISIKOGEBIETE NACH: CDC HEALTH INFORMATION FOR INTERNATIONAL TRAVEL 2012, OXFORD UNIVERSITY PRESS, 2012

Vorhaben so genau wie möglich. Informationsveranstaltungen finden weiterhin regelmäßig statt. Zu der wöchentlichen Versammlung im Kulturhaus von Tapachula, die ich besuche, haben sich etwa 30 Männer und 5 Frauen eingefunden, alle in verantwortlichen Positionen. Zunächst berichtet die Leiterin der Forschungsstation Janine Ramsey vom Stand der Versuche. Mit ihrer lebhaften, auch humorvollen Art, die so gar nicht mehr nordamerikanisch wirkt, scheint sie ihr Publikum zu fesseln. Später stellen die Leute zögernd Fragen. Ein Mann erkundigt sich, ob er die Käfige besichtigen darf. Ein anderer möchte wissen, was passieren würde, wenn Moskitos entweichen. Eine junge Frau fragt, wieso Menschen etwas gegen transgene Organismen haben. Einem älteren Mann aus einem Bergdorf ist der Unterschied zwischen Denguefieber und Malaria nicht klar. Ramsey antwortet jedem und gibt zum Abschied allen die Hand. »Wir verstehen das Projekt nun, und es gefällt uns«, erklärt der Sojabauer Barrios Matute. »Das wird nicht nur Rio Florido nützen. Es kann für die ganze Gegend hier gut sein und für ganz Mexiko, überhaupt für viele Orte der Welt.«

Völlig anders war Oxitec in der Karibik vorgegangen. Wie Luke Alphey auf der Jahrestagung der American Society of Tropical Medicine and Hygiene in Atlanta Ende 2010 dem überraschten Auditorium erzählte, hatten sie auf Grand Cayman die ersten genmanipulierten männlichen Gelbfiebermücken im September 2009 ausgesetzt und dann während des Sommerhalbjahrs 2010 nochmals über drei Millionen Männchen freigelassen. Laut Alphey schrumpfte die lokale Population daraufhin um 80 Prozent. Der verwendete Zuchtstamm funktioniert genetisch etwas anders als der in der Tapachula-Studie: Die im Freiland erzeugten Nachkommen sterben in beiden Geschlechtern schon als Larven und verbreiten sich deshalb nicht weiter.

Alphey verteidigt sich gegen Vorwürfe: Die Öffentlichkeitsarbeit möchte Oxitec bei seinen Projekten weit gehend den Regierungen überlassen. Die verstünden die kulturellen Empfindlichkeiten am besten. Auf Grand Cayman brachten lediglich die Abendnachrichten einen Fünfminutenbeitrag. Und es gab eine Broschüre, in der stand, die freigelassenen Moskitos seien steril – allerdings war darin keine Rede von genetischer Manipulation. Weder fanden öffentliche Informationsveranstaltungen statt noch bot man der Bevölkerung Gelegenheit, Bedenken zu äußern. Der Firmenchef sagte auf dem Kongress in Atlanta, man habe die Aktion zunächst nur auf den Kaimaninseln publik gemacht, denn nur deren Bewohner mussten davon wissen.

Einen Fürsprecher findet Alphey in dem Molekularbiologen Mark Q. Benedict von der Università degli Studi di Perugia (Italien), der selbst über sterile Insekten forscht und Berater der Bill & Melinda Gates Foundation ist. Oxitec habe keine Gesetze gebrochen. Die Kaimanstudie sei mutig gewesen, habe man doch eine Technologie geprüft, die im Guten wie im Schlechten Aufmerksamkeit erregen muss. Durch verwirrende und widersprüchliche Meldungen in den Medien sei

der Eindruck entstanden, dass da ein einzelner Forscher unbekümmert einfach eimerweise Moskitos in die Gegend gekippt habe. So sei das aber nicht gewesen. Oxitec arbeite bei seinen Projekten mit den örtlichen und staatlichen Stellen zusammen und hole dort im Voraus für seine Versuche Genehmigungen ein.

Trotzdem löste Alpheys Vorstoß in der Öffentlichkeit, bei Umweltgruppen und bei vielen Kollegen Kritik, Argwohn und Enttäuschung aus. Bart Knols, Medizinentomologe an der Universität Amsterdam und geschäftsführender Direktor des Netzwerks MalariaWorld, bringt es auf den Punkt: Alle Welt frage sich, ob die Heimlichtuerei nötig war. Natürlich wecke das Misstrauen. Die Technologie selbst hält auch Knols für viel versprechend. Nur – wenn einer Mist baue und die Öffentlichkeit nicht richtig informiere, könne das auf andere Projekte mit transgenen Organismen zurückschlagen. »Wegen Oxitec bekommen wir jetzt womöglich die gleichen Probleme wie die WHO 1976 in Indien.« Außerdem argwöhnen manche Experten, dass sich Oxitec absichtlich Länder mit laxen Gesetzen aussucht. Laut Stephanie James war auf den Kaimaninseln ein Gesetzesentwurf zur biologischen Sicherheit gerade verabschiedet, das Gesetz aber noch nicht gültig.

Das Für und Wider der Freisetzung

Ebenfalls umstritten ist die Situation in Malaysia, wo Oxitec Ende 2010 in einer unbewohnten Gegend eine Feldstudie begann – unter dem Protest verschiedener Organisationen. Das Land verfügt zwar über einen Rat für biologische Sicherheit und seit Kurzem auch über Gesetze dazu. Doch es herrscht Skepsis, ob die nötige Expertise vorhanden ist, solche Versuche zu bewerten und zu überwachen. Auch im nordostbrasilianischen Bundesstaat Bahia, in einem armen Vorort von Juazeiro, nahm Oxitec 2011 einen halbjährigen Freisetzungsversuch in Angriff. Die Menschen dort sind das ganze Jahr über von Moskitos und Denguefieber geplagt. Auf Grand Cayman soll überdies das Potenzial der beiden hier beschriebenen transgenen Tigermückenstämme im Vergleich getestet werden – also mit dem schon auf der Insel erprobten und dem in Tapachula untersuchten –, um herauszufinden, welcher die günstigeren Eigenschaften hat. Interesse an der Methode meldeten mittlerweile Behördenvertreter von Panama und den Philippinen an sowie Verantwortliche von Florida, wo nach Jahrzehnten Denguefieber inzwischen wieder vorkommt.

Andererseits lehnen manche Interessengruppen das Freisetzen genmanipulierter Organismen grundsätzlich ab, selbst wenn die Forscher offen damit umgehen und alle Umsicht walten lassen. Die Wissenschaftlerin Janet Cotter von den Greenpeace-Forschungslaboren in Exeter (England) hält die Versuche von Oxitec für hochriskant. Denn es gäbe einfach keine 100-prozentige Sterilität. Allzu leicht würden unabsichtlich auch ein paar transgene reproduktionsfähige Weibchen mit frei gelassen – mit unabsehbaren Folgen.

Manche fragen sich sogar, ob es ethisch und ökologisch vertretbar ist, einen Organismus gezielt auszulöschen, und sei es nur in einem kleinen Gebiet. Die Befürworter des Vorhabens argumentieren, die Gelbfiebermücke im Umfeld menschlicher Besiedlung sei eine invasive Form mit Spezialisierung auf diese Nische und den Menschen. Laut Phil Lounibos, Moskitoökologe am Florida Medical Entomology Laboratory, gehört die urbane Form zu keiner wichtigen natürlichen Nahrungskette. Trotzdem kann er sich nicht vorstellen, dass man das Denguefieber mit solchen Vernichtungsaktionen endgültig ausrotten wird. Einerseits gab es auf dem amerikanischen Kontinent in den 1950er und 1960er Jahren schon einmal eine derartige Kampagne, damals gegen urbanes Gelbfieber, und die scheiterte kläglich. Außerdem dringt die verwandte Asiatische Tigermücke (*Stegomyia albopicta* oder *Aedes albopictus*) bereitwillig in die frei werdenden Nischen vor – auch sie eine häufige Überträgerin von Dengueviren. Aber vor allem halten sich die transgenen Mücken nicht ewig. Dann könnten sich von Randgebieten her erneut Moskitos ausbreiten. Man müsste also immer wieder veränderte Mückenmännchen freisetzen.

Deswegen beschäftigen sich James und viele seiner Kollegen auch damit, den Moskitopopulationen dauerhaft Resistenzgene gegen den Krankheitserreger aufzuzwingen. Derart manipulierte Mücken würden das Denguevirus nicht mehr übertragen. Zu diesem Zweck möchten Forscher verschiedene natürliche Genverbreitungsmechanismen nutzen. Damit ausgestattete Moskitos würden die neue Eigenschaft in die Population einbringen, wo sie mit der Zeit zunehmend um sich griffe. Bis zu ersten Feldversuchen gegen einen der Serotypen des Denguevirus dürften aber mindestens noch einige Jahre verstreichen.

DIE AUTORIN

Bijal P. Trivedi studierte in den USA Molekularbiologie und Biochemie. Sie schreibt als Wissenschaftsjournalistin über biologische, Umwelt- und Medizinthemen und lebt in Washington.

QUELLEN

Thomas, D. D. et al.: Insect Population Control Using a Dominant, Repressible, Lethal Genetic System. In: Science 287, S. 2474–2476, 2000
Wise de Valdez, M. R. et al.: Genetic Elimination of Dengue Vector Mosquitos. In: Proceedings of the National Academy of Sciences USA 108, S. 4772–4774, 2011

LITERATURTIPP

O'Brochta, D. A., Atkinson, P. W.: Moskitos und Milben nach Maß. In: Spektrum der Wissenschaft 9/1999, S. 36–41
Artikel zur Gentechnik an Schadinsekten und Krankheitsüberträgern und zu anderen Methoden der Bekämpfung

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1155290**

Aus der Nähe betrachtet wäre eine Supernova ein atemberaubender Anblick. Allerdings würde dabei auf einem Planeten, der den explodierenden Stern umkreist, höchstwahrscheinlich jede Spur von Leben vernichtet.

ASTROPHYSIK

Superhelle Supernovae

Kürzlich entdeckten Astronomen explodierende Sterne, die ungeahnte Energiemengen freisetzen. Ein Spektakel, das es in sich hat – denn offenbar entstehen aus Photonen enorme Mengen von Materie und Antimaterie.

Von Avishay Gal-Yam

RON MILLER

Mit über 4000 Metern ist der Mauna Kea der höchste Berggipfel auf Hawaii. Auf ihm befinden sich mehrere internationale Observatorien – zusammengenommen die größte Sternwarte der Welt. Zu ihnen gehört das Keck-Observatorium mit seinen zwei riesigen Zehn-Meter-Spiegelteleskopen. Eines der beiden erhielt Mitte 2005 eine so genannte adaptive Optik, mit der das Instrument automatisch die störenden Turbulenzen der Lufthülle kompensiert und nun ebenso scharfe Bilder liefert wie das Hubble-Weltraumteleskop. Der Astrophysiker Shrinivas Kulkarni vom California Institute of Technology (kurz Caltech) in Pasadena drängte mich und andere junge Forscher seines Instituts, uns schleunigst um Beobachtungszeit zu bewerben. Denn wenn in der Fachwelt erst einmal bekannt wäre, wie großartig das Teleskop jetzt funktioniere, würden wir darum kämpfen müssen.

Also konzipierte ich zusammen mit meinen damaligen Postdoc-Kollegen Derek Fox und Doug Leonard eine Untersuchung, die zuvor praktisch nur mit dem Hubble-Teleskop möglich gewesen war: Wir jagten nach Supernova-Vorläufern. Das heißt, wir wollten wissen, wie Sterne aussehen, die gleich explodieren werden.

Theoretiker können schon seit Jahrzehnten vorhersagen, welche Himmelskörper sich in Supernovae verwandeln werden. Zum Beispiel wissen sie, dass helle blaue Sterne kurz vor der Explosion stehen. Allerdings versteht ein Astronom unter »kurz« rund eine Million Jahre. Gewiss würden wir den Ablauf besser verstehen, wenn wir seine gesamte Entwicklung beobachten könnten, aber geduldiges Betrachten einzelner Sterne kommt dafür nicht in Frage.

Im November 2005 gewährte uns das Keck-Observatorium eine einzige Nacht Beobachtungszeit. Aufgeregt flog ich zur Hauptinsel von Hawaii und hoffte auf gute Sichtverhältnisse, denn wir hatten nur diese eine Chance. Zum Glück spielte das Wetter mit – und in jener Nacht begann für mich ein Forschungsabenteuer, das seitdem die gängige Ansicht über die maximale Größe von Sternen und deren Ende völlig verändert hat.

Damals glaubten die Experten, dass sehr große Sterne nicht explodieren, sondern allmählich schrumpfen und in Form von Sternenwind Masse verlieren. Die meisten Astrophysiker meinten sogar, wegen dieser starken Winde könnten die Sterne im gegenwärtigen Universum von vornherein nicht allzu sehr wachsen – höchstens bis auf rund 100 Sonnenmassen. Doch wie wir auf Grund unseres Hawaii-Abenteuers herausfanden, gibt es in unserem Universum Sterne von mindestens 200 Sonnenmassen, die ihr Dasein mit den energiereichsten Explosionen überhaupt beenden. Ebenso überraschte uns die Entdeckung, dass einige dieser Sterne auf völlig unerwartete Weise explodieren, wobei in ihrem Zentrum Antimaterie entsteht.

Derart riesige Himmelskörper – und wahrscheinlich sogar noch größere – waren auch die ersten, die sich in der Frühgeschichte des Universums aus Gas bildeten. Daher erfahren wir aus der Art ihrer Explosion, wie sich die dabei erzeugten chemischen Elemente durch den Kosmos ausbreiteten und letztlich zu den Keimen heutiger Sonnen, Planeten und Menschen wurden.

Ein unwahrscheinlicher Anfang

Während unserer knappen Zeit am Teleskop planten Fox, Leonard und ich, eine aktive Supernova zu beobachten. Dann wollten wir durch Vergleiche mit Archivaufnahmen des Hubble-Teleskops ein Bild des Sterns vor seiner Explosion finden. Natürlich ist es schwierig, auf einem Hubble-Foto zu erkennen, welcher Lichtpunkt unter den Milliarden Sternen einer Galaxie ein Supernova-Vorläufer ist. Dafür gilt es erst einmal, den Ort der Supernova sehr präzise zu vermessen. Vor der Installierung der adaptiven Optik im Keck-Observatorium war das wiederum nur mit dem Hubble-Teleskop möglich gewesen – und selbst damit hatten die Astronomen bis dahin nur drei Vorläufersterne zu identifizieren vermocht.

Unter den zur Beobachtungszeit aktiven Supernovae wählten wir eine namens SN 2005gl aus. Andere Teams hätten das für eine schlechte Wahl gehalten, und zwar aus gutem Grund: Üblicherweise suchen die Forscher nach Supernova-Vorläufern in einem Umkreis von rund 60 Millionen Lichtjahren, doch unser Kandidat lag mit 200 Millionen Lichtjahren mehr als dreimal so weit von der Erde entfernt. Damit wir den Vorläufer von SN 2005gl auf Hubble-Bildern finden konnten, musste er zu den leuchtkräftigsten je beobachteten Sternen gehören. Mit der Annahme, es könne so extrem stark leuchtende und somit massereiche Supernova-Vorläufer geben, gingen wir ein hohes Risiko ein.

Und wir hatten Glück. Nachdem wir die Position von SN 2005gl anhand der Keck-Daten vermessen hatten, fanden wir tatsächlich auf einem Hubble-Bild genau am richtigen Ort etwas, das einem Stern ähnlich sah. Falls es sich um einen einzigen Himmelskörper handelte, war er in der Tat extrem leuchtkräftig: eine Million Mal heller als die Sonne und somit mindestens 100-mal so schwer. Doch da ein solcher Koloss nach herrschender Auffassung gar nicht explodieren durfte, hätten die meisten Astronomen den Lichtfleck auf dem Hubble-Foto eher für einen Cluster aus kleineren und schwächeren Sternen gehalten, die zusammen die beobach-

AUF EINEN BLICK

WIE HYPERRIESEN ENDEN

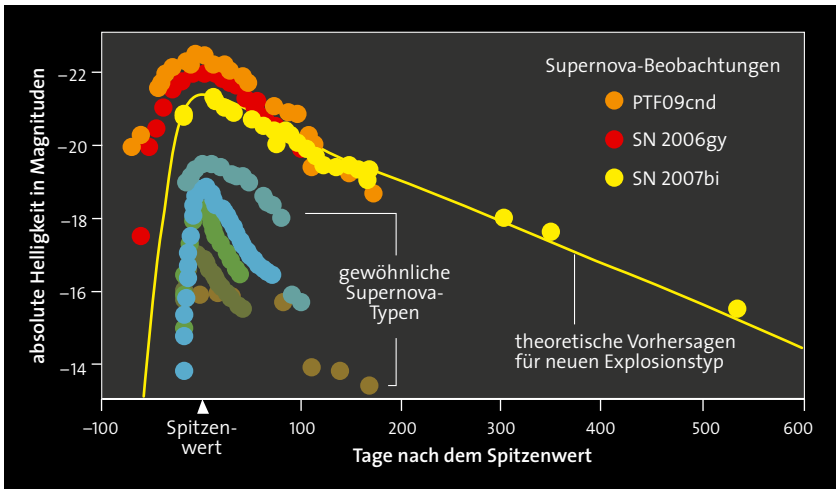
1 Einige Supernovae setzen ungeahnt viel **Energie** frei und leuchten besonders lange.

2 Archivaufnahmen zufolge müssen ihre **Vorläufersterne** 100-mal mehr Masse als die Sonne gehabt haben – doch nach der gängigen Theorie dürften so große Sterne gar nicht explodieren!

3 An manchen Supernovae ist offenbar die spontane **Bildung vieler Teilchen und Antiteilchen** beteiligt. Solche Vorgänge spielten vor allem bei der Explosion der ersten Sternriesen im frühen Universum eine Rolle.

Die grellsten Explosionen

Die vom Autor und seinen Mitarbeitern untersuchten Supernovae erwiesen sich als die energiereichsten Sternexplosionen, die je beobachtet wurden. Ein Rekordereignis begann 2006 (rot) und wurde 2009 von einem anderen überboten (orange). Beide dauerten relativ kurz. Eine weitere Supernova im Jahr 2007 erreichte zwar nicht den höchsten Spitzenwert, setzte aber die größte Gesamtenergie frei (gelb). Sie war das erste Beispiel für einen neuen Supernova-Typ, der offenbar von sehr massereichen Sternen ausgeht (siehe Kasten auf den folgenden Seiten).



tete Helligkeit erzeugten. Mit unseren Daten ließ sich diese Möglichkeit zunächst nicht ausschließen.

Obwohl unser Resultat nicht beweiskräftig war, suchte ich weiter nach Indizien für das Schicksal extrem massereicher Sterne. 2006 kam mir erneut der Zufall zu Hilfe. Wieder saß ich eines Nachts im Keck-Observatorium, doch diesmal herrschte scheußliches Wetter. Stundenlang wartete ich am Steuerungscomputer und begann mich gerade zu fragen, ob die umständliche Anreise umsonst gewesen war, als endlich die Wolken aufrissen und ein paar Sterne preisgaben. Ich nahm eine Supernova-Explosion namens SN 2006gy ins Visier. Robert Quimby, damals Doktorand an der University of Texas in Austin, hatte sie erst acht Tage zuvor mit einem Teleskop entdeckt, das 20-mal kleiner war als die riesigen Keck-Spiegel. Aber schon nach einer Viertelstunde bildete sich wieder eine geschlossene Wolkendecke. Scheinbar war die Nacht ein kompletter Fehlschlag.

Noch eine unmögliche Explosion

Doch dann analysierte ein Team um den Caltech-Kollegen Eran Ofek meine Daten, und SN 2006gy entpuppte sich als die leuchtkräftigste bis dahin entdeckte Supernova-Explosion. Zum gleichen Ergebnis kam Nathan Smith an der University of California in Berkeley. Das stellte uns vor ein Rätsel, denn keiner der damals bekannten Supernova-Typen vermag so viel Strahlung zu erzeugen. Da SN 2006gy in einer noch nicht von Hubble fotografierten Galaxie lag, konnten wir den Vorläuferstern nicht detailliert untersuchen; doch angesichts der Heftigkeit seiner Explosion musste er mindestens 100 Sonnenmassen haben.

Für die exzessive Leuchtkraft zogen wir zwei mögliche Erklärungen in Betracht. Erstens: Es handelte sich um Wärmestrahlung einer Stoßwelle, die entstand, als die Explosionsreste der Supernova den langsameren Sternenwind, den der Stern selbst vor seiner Explosion emittiert hatte, einholten und wegfegten. Oder zweitens: Supernovae bringen neue Elemente hervor, und zwar vorwiegend in Form radioaktiver Isotope, die später in stabilere Elemente zerfallen. Vielleicht erzeugte die gewaltige Explosion riesige Mengen radioaktiven Materials, dessen langsamer Zerfall Energie in eine expandierende Wolke aus Sterntrümmern pumpte und sie zur Fluoreszenz brachte? Nur: Wodurch entstand genug radioaktive Substanz zur Erklärung der ungeheuren Leuchtkraft?

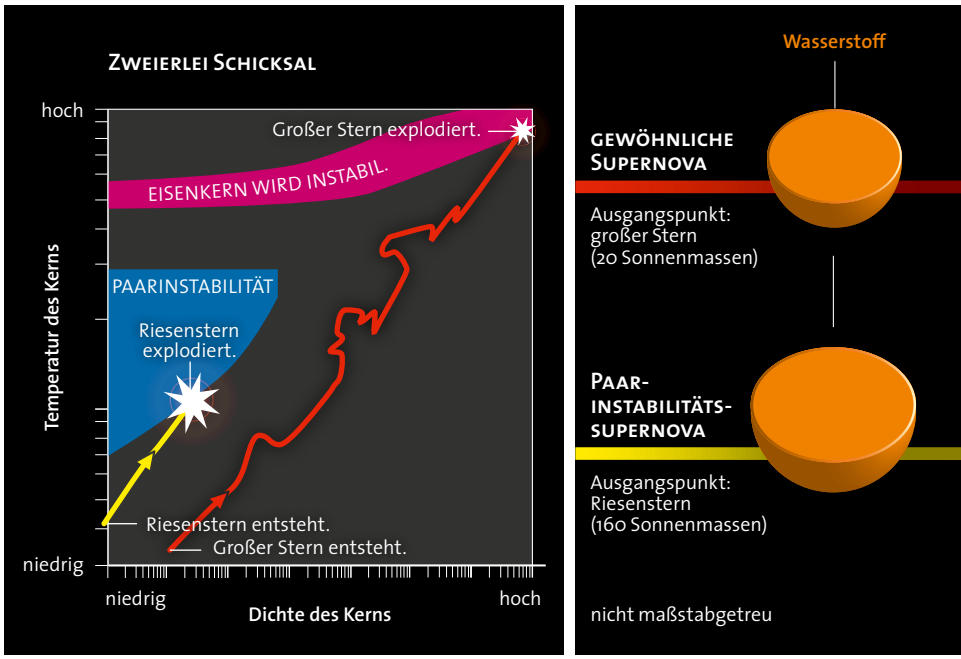
Auf der Suche nach einer Antwort stießen wir auf verstaubte theoretische Artikel vom Ende der 1960er Jahre. Drei junge Astrophysiker – Gideon Rakavy, Giora Shaviv und Zalman Barkat – hatten damals ein neuartiges Modell für Sternexplosionen vorgeschlagen.

Sterne leuchten, weil ihr Kern so dicht und heiß ist, dass Wasserstoffatome zu Helium und schwereren Elementen verschmelzen; dabei wird Fusionsenergie frei. Die physikalischen Vorgänge im Kern eines massereichen Sterns und dessen weitere Entwicklung hängen im Wesentlichen von der dortigen Dichte und Temperatur ab. In der Regel wird der Sternkern mit der Zeit dichter und heißer; dabei entstehen durch Fusion sukzessive immer schwerere Elemente – erst Helium, danach Kohlenstoff, später Sauerstoff und so weiter. Dazwischen können Tausende bis Milliarden Jahre vergehen, je nachdem, wie schnell die nuklearen Fusionsprozesse Temperatur und Dichte im Sterninneren verändern.

Rakavy und sein Team hatten berechnet, was geschieht, wenn ein sehr massereicher Stern – hunderte Male so schwer wie die Sonne – ein Stadium erreicht, in dem sein Kern vorwiegend aus Sauerstoff besteht. Bei kleineren Sternen wissen wir, was dann passiert: Der Stern zieht sich unter der eigenen Schwerkraft zusammen, und sein Kern erhitzt sich, bis die Fusion von Sauerstoff zu Silizium möglich wird. Doch der Kern eines Hyperriesen wird den Berechnungen zufolge bei der Kontraktion zwar heiß, aber nicht sehr dicht. An Stelle der Fusion von Sauerstoff tritt so genannte Paarerzeugung auf.

Wie große Sterne enden

Sterne strahlen durch nukleare Fusion, wobei neue Elemente entstehen. Während ein Stern altert, wird sein Kern heißer und dichter (siehe Diagramm links im Bild) und erzeugt immer schwerere Elemente, die sich wie Zwiebelschalen anordnen (Zeichnung, rechter Bildteil). Ein relativ schwerer Stern mit ungefähr 20 Sonnenmassen (rote Kurve im Diagramm) wird schließlich so dicht, dass er kollabiert und einen Großteil seiner Energie und Masse ausstößt. Doch ein sehr schwerer Stern mit rund 160 Sonnenmassen (gelbe Kurve) vernichtet sich schon viel früher – in einer noch heftigeren Explosion.



In genügend heißer Materie emittieren Atomkerne und Elektronen sehr energiereiche Photonen im Gammastrahlungsbereich. Da Masse und Energie nach Albert Einsteins berühmter Gleichung $E = mc^2$ austauschbar sind, können sich zwei energiereiche Photonen beim Zusammenstoß spontan in ein Partikelpaar verwandeln – insbesondere in ein Elektron und sein Antiteilchen, ein Positron. Auf diese Weise wird die Energie der Photonen größtenteils in Form von Materie quasi eingefroren. Die Elektronen und Positronen üben aber viel weniger Druck aus als die Photonen, aus denen sie hervorgegangen sind. Während Letztere mit ihrem Strahlungsdruck den Kollaps des Sterns unter seinem eigenen Gewicht aufgehalten haben, wird der Kern nun instabil und beginnt, sich rasch zusammenzuziehen.

Instabil durch Paarerzeugung

Ebenso schlagartig steigt die Dichte, und das setzt die Sauerstofffusion in Gang. Da dies nicht in einem stabilen, sondern in einem kollabierenden Kern geschieht, läuft die Zündung explosiv ab: Die von der Fusion freigesetzte Energie heizt das Material weiter auf, und das wiederum beschleunigt die Fusion durch positive Rückkopplung. Der Stern kann in Minutenschnelle so viel Sauerstoff verbrennen, dass die dadurch erzeugte Energie die gesamte Gravitationsenergie des Sterns übersteigt. Darum vernichtet sich der Himmelskörper bei diesem Explosionstyp praktisch restlos, während typische Supernovae einen Neutronenstern oder ein Schwarzes Loch hinterlassen. Zurück bleibt lediglich eine rasch expandierende Wolke, die größtenteils aus den bei der Explosion gebildeten Elementen besteht.

Die Theoretiker sagten voraus, diese so genannte Paarinstabilitätssupernova würde neben anderen relativ schweren Elementen eine riesige Menge Nickel-56 bilden. Das Isotop Ni-56 ist radioaktiv und wird letztlich zu nichtradioaktivem Eisen. Dann könnte unserer Ansicht nach der Zerfall von Ni-56 die starke Leuchtkraft von SN 2006gy erklären.

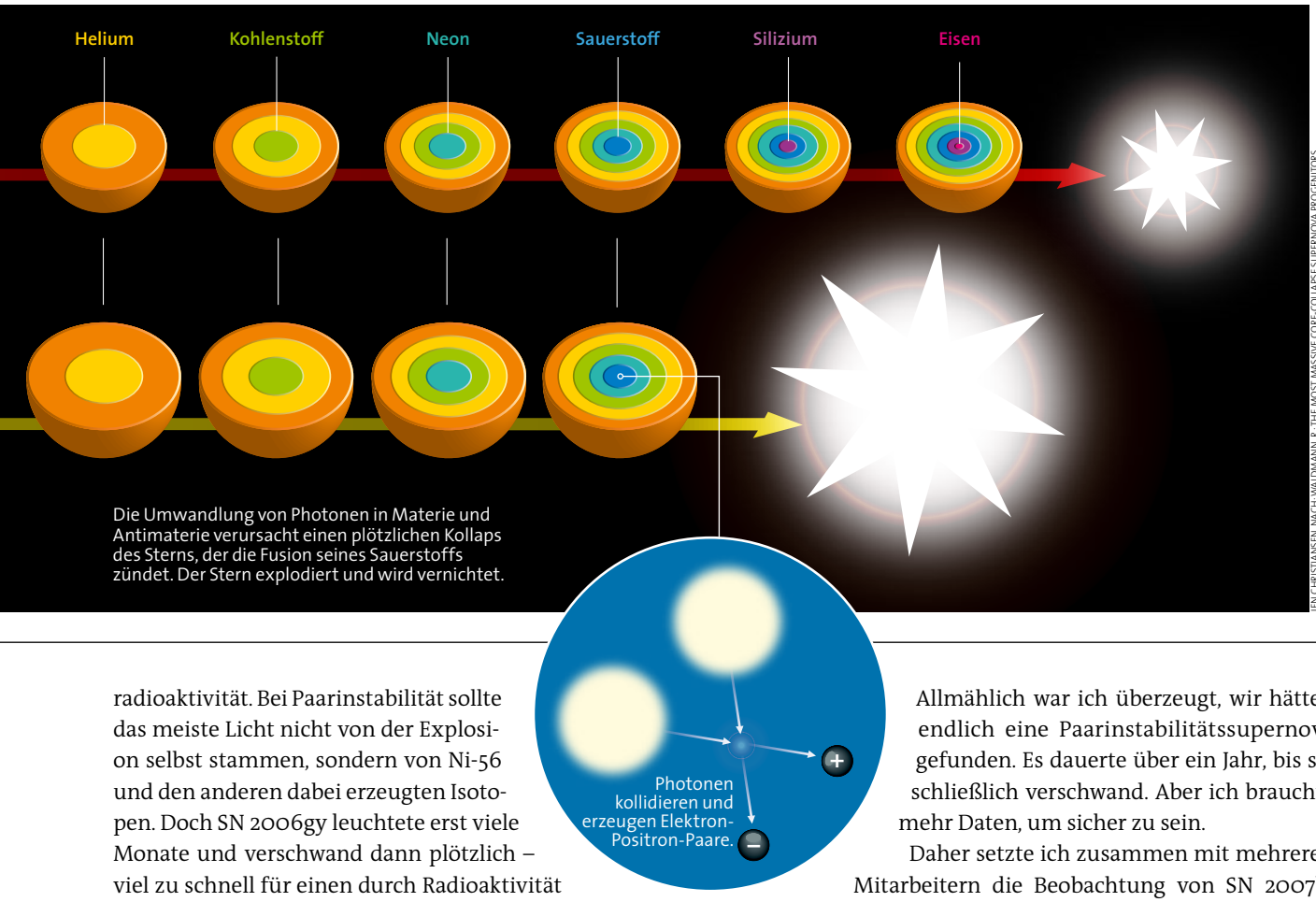
Gegen das theoretisch durchaus plausible Szenario sprach nur, dass es nach damals gängiger Meinung in der Natur nicht wirklich vorkam. Derart massereiche Sterne, hieß es, dürften sich gar nicht bilden, zumindest nicht im gegenwärtigen Universum. Und selbst wenn sie entstünden, würden sie so starke Sternenwinde erzeugen, dass sie rasch den größten Teil ihrer Masse verlören und niemals genügend massereiche Kerne bilden könnten, um die Paarinstabilität zu erreichen. Bestenfalls knapp eine Milliarde Jahre nach dem Urknall wären die ersten Sterne schwer genug gewesen, um als Paarinstabilitätssupernovae zu explodieren – vielleicht.

Unterdessen wurden viele Astronomen auf die spektakuläre neue Supernova SN 2006gy aufmerksam und begannen sie eifrig zu erforschen. Obwohl dabei das Paarinstabilitätsmodell eine Renaissance erlebte, schien es ausgerechnet auf SN 2006gy nicht zuzutreffen: Die Lichtkurve – das Abnehmen der Strahlung mit der Zeit – passte nicht zur Nickel-

W I S wissenschaft in die schulen!

Didaktische Materialien für den Unterricht zum Thema »Supernovae« kostenfrei herunterladen unter:

www.wissenschaft-schulen.de/supernovae



Die Umwandlung von Photonen in Materie und Antimaterie verursacht einen plötzlichen Kollaps des Sterns, der die Fusion seines Sauerstoffs zündet. Der Stern explodiert und wird vernichtet.

JEN CHRISTIANSEN, NACH: WALDMANN, R.: THE MOST MASSIVE CORE-COLLAPSE SUPERNOVA PROGENITORS. IN: ASTROPHYSICAL JOURNAL 685, S. 1103–1108, 2008

radioaktivität. Bei Paarinstabilität sollte das meiste Licht nicht von der Explosion selbst stammen, sondern von Ni-56 und den anderen dabei erzeugten Isotopen. Doch SN 2006gy leuchtete erst viele Monate und verschwand dann plötzlich – viel zu schnell für einen durch Radioaktivität angetriebenen Vorgang. Wahrscheinlich handelte es sich gar nicht um eine Paarinstabilitätssupernova, und unsere Alternativerklärung, die ungewöhnliche Helligkeit stamme von einer Stoßwelle, gewann die Oberhand. Doch nun suchte ich erst recht nach Paarinstabilitätsereignissen.

Endlich ein Volltreffer?

Einige Monate nach dem Zufallstreffer trotz Wolken über Hawaii machte ich Urlaub in Colorado. Dort erreichte mich eine E-Mail von Peter Nugent vom Lawrence Berkeley National Laboratory. Wir beide hatten gerade mit dem Probelauf für eine große Supernova-Suche begonnen. Jetzt mailte er mir das höchst seltsame Spektrum einer Supernova. So etwas hatte ich noch nie gesehen.

Da die Atome jedes Elements Licht ganz bestimmter Wellenlängen absorbieren und aussenden, liefert das Sprektrum einer astronomischen Quelle Informationen über ihre chemischen Bestandteile. Demnach musste Nugents Supernova namens SN 2007bi ungewöhnlich zusammengesetzt und extrem heiß sein.

Nach meiner Rückkehr zum Caltech verfolgte ich die weitere Entwicklung von SN 2007bi. Das Objekt emittierte rund zehnmal mehr Strahlung als eine typische Supernova, und die Lichtmenge nahm sehr langsam ab. Diese Quelle leuchtete einfach immer weiter – tage-, wochen-, monatelang. Allmählich war ich überzeugt, wir hätten endlich eine Paarinstabilitätssupernova gefunden. Es dauerte über ein Jahr, bis sie schließlich verschwand. Aber ich brauchte mehr Daten, um sicher zu sein.

Daher setzte ich zusammen mit mehreren Mitarbeitern die Beobachtung von SN 2007bi mit Teleskopen des Palomar-Observatoriums am Caltech fort. Rund ein Jahr nach der Entdeckung dieser Explosion wurde ihre Strahlung schließlich schwächer; nun bat ich meine Caltech-Kollegen Richard Ellis und Kulkarni, sie mit den großen Keck-Teleskopen zu beobachten, und versprach ihnen, ein Durchbruch stehe kurz bevor.

Unterdessen zog ich mit meiner Familie nach Israel um und begann meine gegenwärtige Tätigkeit am Weizmann Institute of Science in Rehovot. Im August 2008 sandten mir Kulkarni und sein Doktorand Mansi Kasliwal das neueste Spektrum von SN 2007bi. Bei einer ersten groben Analyse traute ich meinen Augen nicht: Diese Explosion produzierte eine unglaubliche Menge an Nickel-56, die fünf bis sieben Sonnenmassen gleichkam. Das war zehnmal mehr, als je beobachtet worden war – und genau das, was man von einer Paarinstabilitätssupernova erwarten durfte. Offenbar hatten wir wirklich eine große Entdeckung gemacht.

Ende 2008 reiste ich nach Garching, um mit Paolo Mazzali am Max-Planck-Institut für Astrophysik zu arbeiten. Als Koryphäe für die exakte Analyse von Supernova-Spektren sollte Mazzali meine grobe Schätzung überprüfen. Außerdem besaß er zusätzliche nützliche Daten, die er mit dem Very Large Telescope des European Southern Observatory in Chile gewonnen hatte. Die Resultate stimmten tatsächlich mit meiner früheren Einschätzung überein: mehrere Son-

nenmassen von Nickel-56 sowie relative Häufigkeiten anderer Elemente, die zum Paarinstabilitätsmodell passten.

Obwohl ich mir nun ziemlich sicher war, dass wir endlich eine Paarinstabilitätssupernova identifiziert hatten, legte ich die Daten nach meiner Rückkehr nach Israel beiseite und wandte mich wieder der anfangs untersuchten Supernova SN 2005gl zu. Als Fox, Leonard und ich Ende 2005 ihren mutmaßlichen Vorläufer gefunden hatten, konnten wir nicht ganz ausschließen, dass es sich dabei um einen Sternencluster handelte. Nun, drei Jahre später, war die Supernova verschwunden, und das ließ einen simplen Test zu: Falls unser Wunschkandidat nicht der explodierte Stern war, musste er noch immer da sein. Leonard und ich studierten noch einmal Hubble-Aufnahmen.

Ein zweiter Anlauf

Gegen Ende 2008 stand fest: Der Stern war verschwunden. Der Vorläufer von SN 2005gl musste wirklich sehr leuchtstark und wahrscheinlich ziemlich massereich gewesen sein – vergleichbar mit Eta Carinae, einem der schwersten blauen Riesen in unserer Galaxis. Damit war die herrschende Theorie für Hyperriesen – wonach sie ihre Masse größtenteils vor der Explosion einbüßen – zumindest in diesem Fall falsch. Es gibt also einige sehr helle und schwere Sterne, die explodieren, bevor sie all ihre Masse verlieren – und vielleicht existieren noch immer einige Hyperriesen, die als Paarinstabilitätssupernovae enden können.

Mit diesem Wissen kehrte ich zu SN 2007bi zurück und suchte intensiv nach Indizien für eine Paarinstabilitätsexplosion. Mein Team und ich analysierten das Spektrum und seine zeitliche Entwicklung; wir verglichen alte und neue Explosionsmodelle. Gegen Ende 2009 wussten wir mit fast unausweichlicher Sicherheit, dass SN 2007bi eine Paarinstabilitätssupernova war. Nach mehr als zwei Forschungsjahren konnten wir endlich unsere Resultate zu publizieren.

Seitdem haben wir drei weitere Ereignisse dieses Typs gesammelt. Alles in allem scheinen sie extrem selten vorzukommen – nur einmal unter 100 000 Supernovae – und setzen einen Stern von 140 bis 200 Sonnenmassen voraus. Sie gleichen riesigen Fabriken zur Elementsynthese und erzeugen die energiereichsten Explosionen, die wir kennen. Damit verdienen sie den Namen Hypernovae.

Besonders faszinierend an dem neuen Supernova-Typ ist, dass er uns einen Blick ins frühe Universum gewährt. Die allerersten Sterne, die einige hundert Millionen Jahre nach dem Urknall zündeten, hatten 100 bis 1000 Sonnenmassen (siehe SdW 2/2002, S. 26). Manche dieser Giganten explodierten wahrscheinlich durch einen Paarinstabilitätsmechanismus. Somit waren die entfernten Verwandten einiger heutiger Supernovae die ersten, die das Universum mit schwereren Elementen versorgten und so Sterne und Planeten wie unsere Sonne und die Erde ermöglichten.

Unseren Beobachtungen zufolge sind auch im heutigen Universum – entgegen früherer Meinung – Hyperriesen wohl gar nicht so selten. Urtümliche Sterne konnten nur in einem fast reinen Wasserstoff- und Heliummilieu extrem groß werden. Bald bremste die Anreicherung von Produkten nuklearer Fusionsprozesse das Sternwachstum. In Anwesenheit schwererer Elemente kollabieren Sterne schneller und zünden deshalb früher; das umgebende Gas wird weggeblasen, bevor der Stern es sich einverleiben und weiterwachsen kann. Aber offenbar bremsen die schwereren Elemente das Sternwachstum nicht so stark, wie Astrophysiker geglaubt haben.

Die 2007 von Nugent und mir geplante Supernova-Suche ist nun in vollem Gang; sie heißt Palomar Transient Factory (etwa: Palomar-Fabrik für veränderliche Quellen). Im Rahmen des Projekts suchen wir nach weiteren Paarinstabilitätsexplosionen; tatsächlich fanden wir dabei einen Kandidaten, der SN 2007bi ähnelt. Künftige Instrumente wie das James-Webb-Weltraumteleskop der US-Weltraumbehörde NASA werden wahrscheinlich auch sehr weit entfernte Paarinstabilitätsexplosionen aufspüren können. Vielleicht werden sie eines Tages sogar das spektakuläre Ende der allerersten Sterne enthüllen, die unser Universum hervorgebracht hat. ~

DER AUTOR

Avishay Gal-Yam promovierte an der Universität Tel Aviv (Israel) in Astrophysik und forschte dann am California Institute of Technology in Pasadena. Jetzt ist er außerdem leitender Wissenschaftler am Weizmann Institute of Science in Rehovot (Israel).

QUELLEN

Gal-Yam, A., Leonard, D. C.: A Massive Hypergiant Star as the Progenitor of the Supernova SN 2005gl. In: Nature 458, S. 865–867, 2009

Gal-Yam, A. et al.: Supernova 2007bi as a Pair-Instability Explosion. In: Nature 462, S. 624–627, 2009

Hillebrandt, W. et al.: Rätselhafte Supernova-Explosionen. In: Spektrum der Wissenschaft 7/2005, S. 36–45

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1155294**

Gleich und Gleich gesellt sich gern

Objekte, die auf Wasseroberflächen schwimmen, verhalten sich oft unerwartet. Verantwortlich dafür sind die beteiligten Grenzflächenenergien.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

> Vielleicht ist viel mehr an der Oberfläche – vielleicht ist alles falsch, was nicht Oberfläche ist?
>
> *Elias Canetti (1905–1994)*

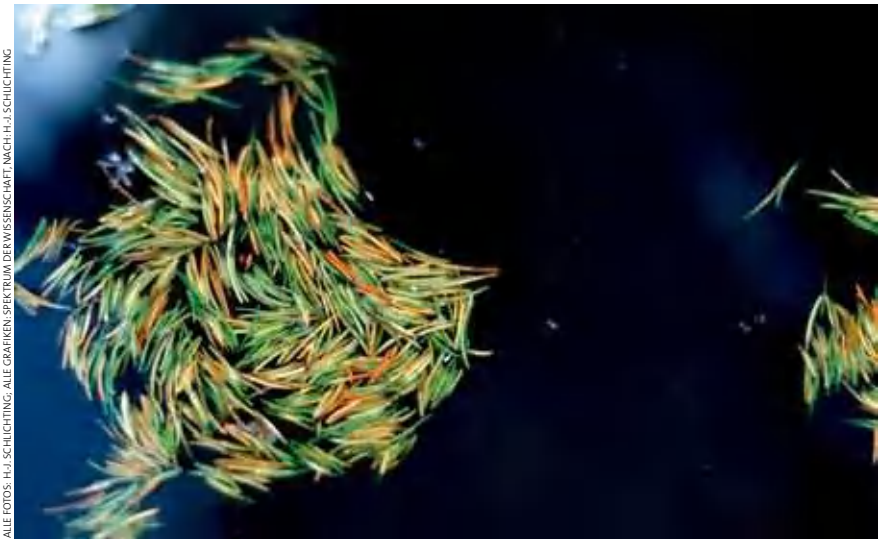
Warum lagern sich Tannennadeln in Pfützen und Teichen gerne zusammen (siehe Foto unten)? Warum schwimmen Styroporkügelchen auf einer Wasseroberfläche mal zu deren Rand, mal aber auch zu deren Mitte hin (Foto S. 50 oben)? Und warum ziehen nahe den Kügelchen platzierte Heftzwecken diese zunächst an, um sie anschließend doch in die Flucht zu treiben? Und vor allem: Was hat all dies miteinander zu tun?

Auf eine erste Gemeinsamkeit stoßen wir schnell. Ähnlich wie Tannennadeln sind auch Styroporkugeln äußerst gesellig – genauso wie Blasen, die aus einem gefüllten Champagnerglas aufsteigen. Kaum haben sie die Oberfläche erreicht, tun sie sich zusammen. Dabei zeigt sich eine weitere Auffälligkeit: Stets scheint der Glasrand die schwimmenden Objekte magisch anzuziehen.

Allerdings lässt sich diese Tendenz umkehren. Platziert man einige Styroporkügelchen auf der Oberfläche des Wassers in einem Glas, bewegen sie sich erwartungsgemäß zum Rand und bleiben dort gewissermaßen hängen. Füllt man das Glas aber vorsichtig weiter auf, bis sich das Wasser linsenförmig über dessen Rand wölbt, lösen sich die Kügelchen wieder und wandern zur Mitte.

Das Verbindende der entgegengesetzten Verhaltensweisen liegt darin, dass die Bewegung stets zur höchsten Stelle der Wasseroberfläche gerichtet ist. Im Fall des übervollen Glases liegt diese in der Mitte der aufgewölbten Linse, im Fall des weniger gefüllten Glases liegt sie am Glasrand. Denn dort zieht sich das Wasser ein Stück weit am inneren Glasrand hoch (siehe Grafik S. 50 unten). Mit dieser Feststellung spitzt sich das Problem aber eher noch zu. Nun müssen wir nicht nur die gegen die Schwerkraft gerichtete Bewegung des Styropors erklären, sondern auch die des Wassers, das die Glaswand emporklettert.

Rücken wir der Angelegenheit zunächst mit einem allgemeinen physikalischen Prinzip zu Leibe: Natürliche Vorgänge laufen stets so ab, dass dabei so viel Energie wie möglich an die Umgebung abgegeben wird. Eine Styroporkugel rollt also genau deshalb zum jeweils tiefsten Punkt ihrer Umgebung und bleibt dort schließlich liegen, weil



ALLE FOTOS: H.-J. SCHLICHTING, ALLE GRAFIKEN: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH H.-J. SCHLICHTING

Tannennadeln auf einer Wasserpfütze lagern sich gerne zusammen, denn auf diese Weise senken sie die Energie des Gesamtsystems »Tannennadeln / Pfütze«.

Styroporkugeln auf einem Wassertropfen driften zu dessen höchster Stelle.

sie auf diese Weise Energie durch Wärme an die Luft und den Boden abgeben kann. In der Schule wurde uns zwar eher beigebracht, in einer solchen Situation mit der nach unten gerichteten Schwerkraft zu argumentieren; doch die energetische Betrachtungsweise ist völlig äquivalent.

Entgegen der Schwerkraft zieht sich das Wasser am Glas hoch

An diesem Prinzip kommen natürlich auch die Styroporkügelchen in unserem Experiment nicht vorbei, obschon sie das Gegenteil dessen tun, was wir spontan erwarten würden. Das liegt daran, dass neben der Höhen- auch die so genannte Grenzflächenenergie eine Rolle spielt.

Gemäß dem genannten Prinzip wachsen jene Grenzflächen bevorzugt, für deren Ausbildung besonders wenig Grenzflächenenergie nötig ist, die also überschüssige Energie an die Umgebung abgeben können. Und weil die Grenzfläche zwischen Wasser und Glas viel weniger Energie benötigt als die zwischen Glas und Luft, neigt das Wasser dazu, sich an der Glaswand »hochzuziehen«. Die dabei gewonnene Energie ist so groß, dass auch die damit verbundene Zunahme der Grenzflächenenergie Wasser / Luft ebenso wie die der Höhenenergie des Wassers kompensiert werden kann – zumindest so lange, bis ein bestimmter Gleichgewichtszustand erreicht ist, der sich durch einen charakteristischen Kontaktwinkel zwischen Glas, Wasser und Luft auszeichnet.

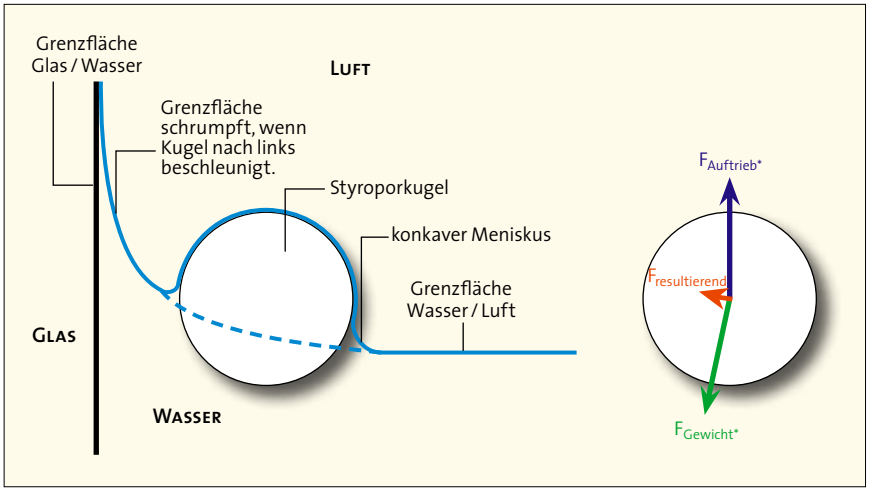
Ähnlich wie die Glaswand würden sich auch Styroporkugeln gern vollständig mit Wasser umgeben. Doch hier tritt ebenfalls bald ein Gleichgewichtszustand ein; das Wasser wird also nur ein Stück weit an den Styroporkugeln hochgezogen und bildet – genau wie am Glasrand – einen konkaven, nach unten gekrümmten Meniskus aus. Was geschieht nun als Nächstes? Um das herauszufinden, müssen wir überlegen, wie das System in einen Zustand mit noch geringerer Energie gelangen könnte. Richtig: Indem sich die Styroporkugeln zum Glasrand bewegen, können sie, wie die unten stehenden Illustrationen zeigen, die Grenzfläche zwischen Luft und Wasser weiter verkleinern.

Statt über Energien zu sprechen, können wir all dies ebenso mit Kräften beschreiben. Betrachten wir die Illustration unten noch einmal. Legt man die Styroporkugeln auf die Wasseroberfläche, sinken sie so lange tiefer, bis die dabei wachsende Auftriebskraft des Wassers die Gewichtskraft der Kugeln gerade ausgleicht.

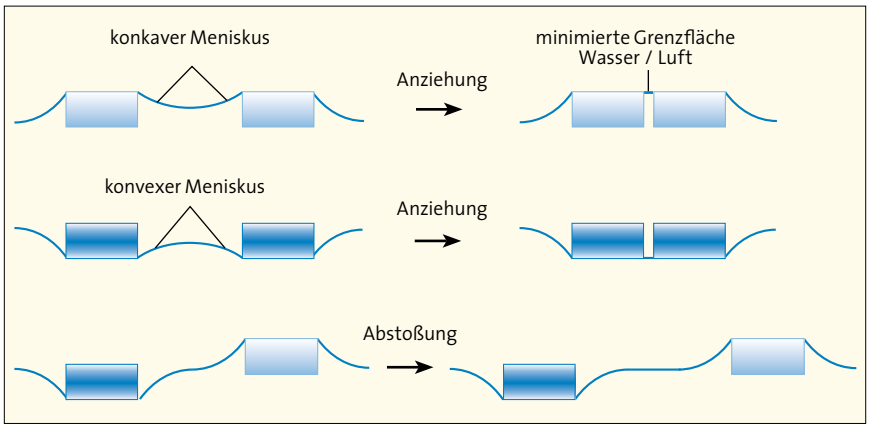
Zusätzlich werden die Kugeln durch hochsteigendes Wasser teilweise benetzt. Dadurch wächst ihre Masse, so dass sie durch die Kraft $F_{Gewicht^*}$ ein wenig tiefer ins Wasser »gezogen« werden. Entsprechend kommt eine zusätzliche Auftriebskraft $F_{Auftrieb^*}$ ins Spiel. Der Stern (*) deutet an, dass nur diejenigen Kräfte gemeint sind, die durch die Benetzung zusätzlich wirken.

Sobald die Wasseroberfläche auch nur ein wenig gekrümmt ist, heben sich beide Kräfte nicht einfach auf, sondern addieren sich zu einer kleinen Kraft $F_{resultierend}$, die in Richtung des Glasrands zeigt und die Kugel an der geneigten Oberfläche hochgleiten lässt. Deshalb treiben auf dem Wasser schwimmende Gegenstände, zumindest wenn ihre Dichte geringer ist als die des Wassers, stets zur höchsten Stelle.

So wird die Anhänglichkeit der Tannennadeln verständlich. Jede von ihnen ist von einem konkaven Wassermeniskus umgeben. Sobald nun eine Nadel die andere »spürt« – genauer: die von deren Meniskus ausgehende



An einer Styroporkugel, die auf einer Wasseroberfläche schwimmt (links), zieht sich Wasser hoch und bildet konkave Menisken aus. Durch die Benetzung wird die Kugel mit der zusätzlichen Kraft $F_{Gewicht^*}$ weiter ins Wasser gezogen, als es allein auf Grund ihrer Gewichtskraft der Fall wäre. Dies ruft die zusätzliche Kraft $F_{Auftrieb^*}$ hervor. Bei gekrümmten Oberflächen wirken die Kräfte in leicht unterschiedliche Richtungen (rechts), so dass eine Kraft $F_{resultierend}$ die Kugel zum Glasrand hin beschleunigt. So schrumpft die Grenzfläche Wasser / Luft und damit deren Energie.



Auf einer Wasseroberfläche können zwei Objekte mit konkaven (obere Zeile) oder konvexen Menisken (mittlere Zeile) die Größe und damit die Energie der Grenzfläche zwischen ihnen minimieren, indem sie sich aufeinander zubewegen. Spürt hingegen ein konkaver Meniskus die Gegenwart eines konvexen, stoßen sich beide voneinander ab (unten).

Krümmung –, entsteht auch hier eine kleine resultierende Kraft, die beide aufeinander zutreibt. Oft verhaken sich die Nadeln allerdings, so dass sie keine energetische Minimalkonfiguration erreichen, sondern sich nur abschnittsweise parallel ausrichten.

Objekte, die dichter sind als Wasser, lassen sich ebenfalls zum Schwimmen bringen. Legt man eine Heftzwecke vorsichtig mit ihrem »Kopf« auf die Wasseroberfläche, so geht sie nicht unter, weil sie zusätzlich zur Auftriebskraft von der elastischen »Wasserhaut« wie von einer gespannten Folie gehalten wird (siehe Fotos unten).

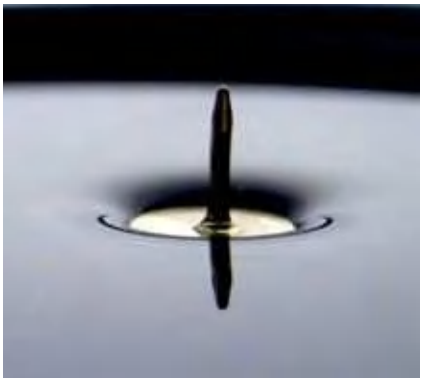
Während jedoch eine Styroporkugel mit einem konkaven Meniskus einhergeht, dellt die schwerere Heftzwecke die Wasseroberfläche ein und umgibt sich mit einem konvexen Meniskus. Die senkrecht zur Wasseroberfläche wirkende Reaktionskraft, die sich aus Grenzflächen- und Auftriebskraft zusammensetzt, bewirkt schließlich, dass die Heftzwecke an der tiefsten Stelle der Delle zur Ruhe kommt.

Wahlweise schnelle Annäherung oder überstürzte Flucht

Sobald jedoch eine weitere Heftzwecke in der Nähe ist, nehmen beide von ihren Menisken Notiz und bewegen sich aufeinander zu, weil dadurch die Grenzfläche zwischen Wasser und Luft verkleinert wird (siehe Grafik oben.) Heftzwecken neigen also ebenso wie Styroporkugeln zur Geselligkeit mit ihresgleichen, suchen sie allerdings in tiefen Regionen. In normal gefüllten Gläsern findet man sie daher eher in der Mitte, in übervollen Gläsern driften sie stattdessen schnell zum Rand, über den sie meist sogar hinausschießen.

Die Beobachtung der Menisken erinnert übrigens stark an magnetische und elektrische Phänomene. Doch dort stoßen gleichnamige Pole oder Ladungen einander stets ab; im Fall der konkaven und konvexen Menisken an der Wasseroberfläche findet hingegen Gleiches zu Gleichem.

Setzt man, am besten mit Hilfe einer Pinzette, eine Heftzwecke in die Nähe einer bereits auf dem Wasser befindlichen zweiten Heftzwecke, so macht man eine weitere, nun leicht zu erklärende Entdeckung. In dem Moment, in dem die Heftzwecke das Wasser so eben berührt, ergreift die andere überstürzt die Flucht. Dafür eilt aber eine nicht allzu weit entfernte Styroporkugel heran. Erst wenn wir die Heftzwecke loslassen und der konkave Meniskus, der bei der leichten Berührung des Wassers entstanden ist, sich in einen konvexen umstülpt, sucht die Styroporkugel erneut das Weite, während die vertriebene Heftzwecke zurückkehrt.



Heftzwecken dellen eine Wasseroberfläche konvex ein (links). »Spüren« sie die Krümmung der Oberfläche, die von einer zweiten Heftzwecke in ihrer Nähe verursacht wird, treiben beide aufeinander zu (rechts).

DER AUTOR

H. Joachim Schlichting war bis 2011 Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. 2008 erhielt er für seine didaktischen Konzepte den Pohl-Preis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1155296

GEOMETRIE

Ein Abenteuer in *n* Dimensionen

Eine Kugel passt gerade noch in eine Kiste, und doch ist sie darin praktisch nicht mehr zu finden. Solche Merkwürdigkeiten erwarten jeden Besucher hochdimensionaler Räume.

Von Brian Hayes

Wie jeder Schüler habe ich brav die Formeln für den Flächeninhalt des Kreises (πr^2) und für das Volumen der Kugel ($(4/3)\pi r^3$; r bezeichnet wie üblich den Radius von Kreis beziehungsweise Kugel) auswendig gelernt – und bin, wie so ziemlich jeder Schüler, nicht auf die Idee gekommen, ernsthaft über sie nachzudenken. Gibt es eine Beziehung zwischen den beiden? Lassen sie sich über die vertraute Welt der zwei- und dreidimensionalen Objekte hinaus auf höhere Dimensionen verallgemeinern? Was ist das »Volumen« einer vierdimensionalen »Kugel«? Gibt es vielleicht eine allgemeine Formel, die ein Inhaltsmaß für das »runde Standardobjekt« im n-dimensionalen Raum angibt?

Erst ungefähr 50 Jahre nach meiner ersten Begegnung mit den genannten Formeln hatte ich endlich Anlass – und Gelegenheit –, mich mit diesen Fragen ausführlicher zu befassen. Die allgemeine Formel für das Volumen der n-dimensionalen Kugel war dank Google und Wikipedia schnell zu finden (siehe unten). Aber die Abhängigkeit des Volumens von der Dimension widersprach nicht nur meinen Erwartungen; sie zählt zum Verrücktesten, was mir je in der Mathematik begegnet ist. Mit Erschrecken musste ich feststellen, dass mir ein wahrhaft bemerkenswertes Phänomen ein halbes Jahrhundert lang verborgen geblieben war.

In jenen Kindheitstagen, als ich die Volumenformel auswendig lernte, spielten wir auch viel mit Bällen – und ärgerten uns jedes Mal über die Unterbrechung, wenn ein Ball im Gebüsch landete. Damals wusste ich es noch nicht; aber wir konnten von Glück reden, dass unser Spielfeld nur die Dimension 2 hatte. Hätten wir den Ball in einem höherdimensionalen Raum verloren, würden wir vermutlich noch heute nach ihm suchen.

Verloren im Raum

Der Mathematiker Richard Bellman hat dieses Phänomen »den Fluch der Dimensionen« (»the curse of dimensionality«) genannt: Mit zunehmender Dimensionszahl wird es immer schwieriger, ein bestimmtes Ding zu finden oder seine Größe zu messen. Das hat ganz praktische Konsequenzen. Ein Standardproblem der angewandten Mathematik ist das Lösen eines Gleichungssystems mit mehreren Unbekannten. Das läuft darauf hinaus, einen Punkt in einem mehrdimensionalen Raum zu finden – eine Dimension für jede Unbekannte. Ebenso verhält es sich mit Optimierungsproblemen: Jede Größe, die man variieren kann, entspricht einer Dimension. Je mehr Unbekannte oder Variable, desto leichter verirrt man sich im Raum der Möglichkeiten.

Eine Möglichkeit, den Fluch der Dimensionen zu veranschaulichen, ist die Kugel in der Kiste (ball in a box). Man packe eine n-dimensionale Kugel in einen n-dimensionalen Würfel, der genau so groß ist, dass die Kugel eben hineinpasst. Mit zunehmendem n nimmt der Anteil des Würfelvolumens, der von der Kugel ausgefüllt wird, dramatisch ab.

Im Deutschen versteht man übrigens unter »Kugel« sowohl das massive runde Objekt als auch dessen Oberfläche, die korrekt als »Sphäre« zu bezeichnen ist. Genau genom-

AUF EINEN BLICK

N-DIMENSIONALE KUGELN UND WÜRFEL

1 Die Begriffe **Kugel** und **Würfel** lassen sich ohne Weiteres auf Räume hoher Dimension verallgemeinern.

2 Mit **zunehmender Dimension** nimmt eine Kugel einen immer kleineren Teil des sie eng umschließenden Würfels ein.

3 Für n gegen unendlich strebt das Volumen der ***n*-dimensionalen Einheitskugel** sogar gegen null.

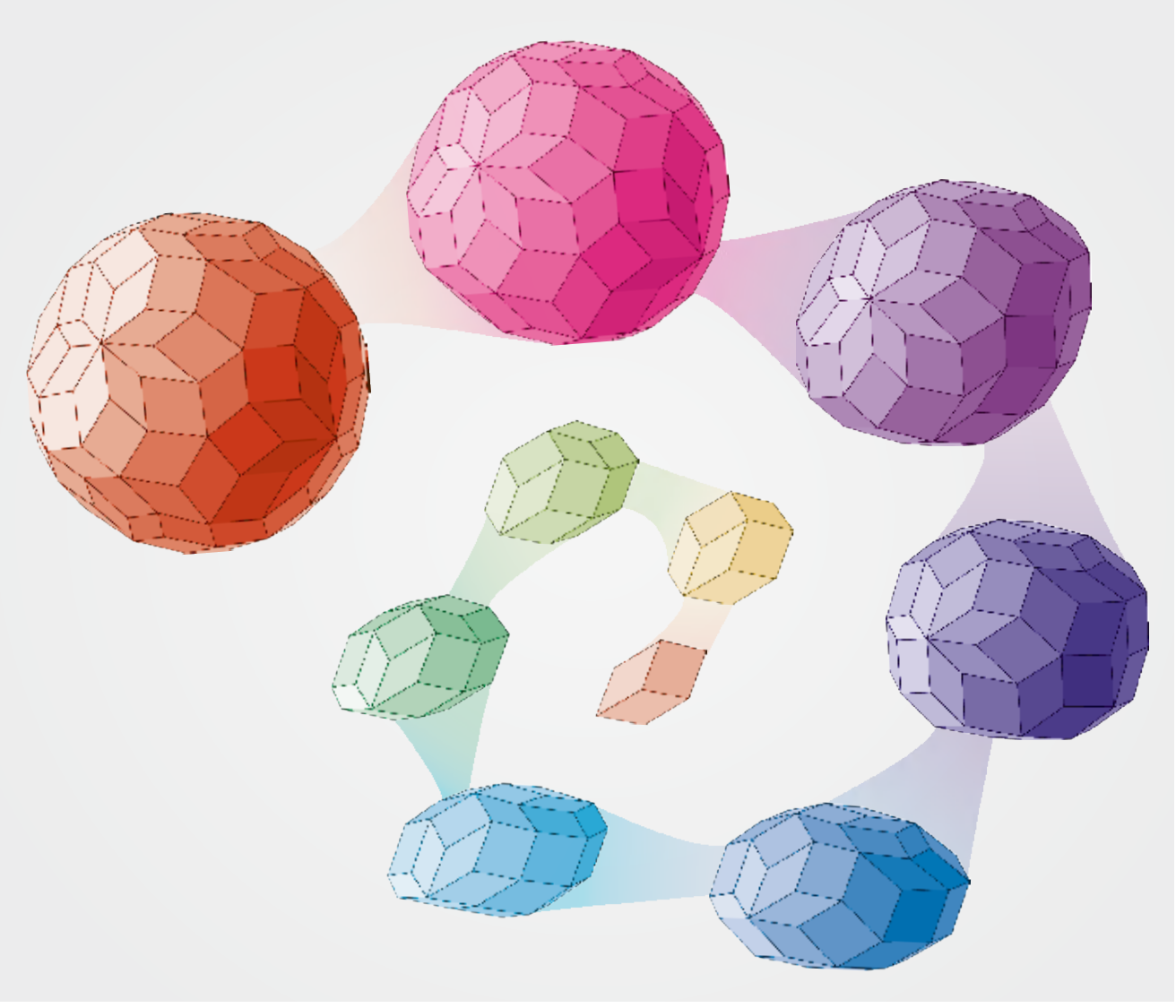
men ist eine Sphäre definiert als die Menge aller Punkte, die von einem gegebenen Punkt, dem »Mittelpunkt«, den Abstand r haben – den Radius der Sphäre. Eine Kugel dagegen ist die Menge aller Punkte, deren Abstand vom Mittelpunkt kleiner oder gleich dem Radius r ist. Was der Abstand zweier Punkte sein soll, ist auch in Räumen beliebiger Dimension einfach und einleuchtend definierbar.

Eine Kugel im n-dimensionalen Raum wird kurz als »n-Kugel« bezeichnet; entsprechend ist das Wort »n-Würfel« zu verstehen. Bei dem Begriff »n-Sphäre« ist Vorsicht geboten, denn die Topologen verstehen darunter den Rand der $(n+1)$-dimensionalen Kugel. So ist die 2-Sphäre die Oberfläche unserer vertrauten 3-Kugel – für einen Topologen eine sinnvolle Bezeichnung, weil es sich um eine zweidimensionale Fläche handelt (vergleiche Spektrum der Wissenschaft 7/2012, S. 60).

Die allgemeine Formel

Eine n-Kugel vom Radius 1 (»Einheitskugel«) passt genau in einen n-Würfel der Kantenlänge 2. Die Oberfläche der Kugel berührt dabei die Mittelpunkte jeder Seitenfläche des Würfels. Welchen Teil des Würfelvolumens füllt die Kugel aus?

Die Einheitswürfel der Dimensionen 3 bis 12 in der Projektion in den gewöhnlichen dreidimensionalen Raum. Diese Darstellung zeigt zwar, dass die Eckenzahl mit der Dimension ansteigt, untertreibt aber diesen Anstieg gewaltig: In Wirklichkeit hat der 12-Würfel bereits $2^{12} = 4096$ Ecken! Eine »Seitenfläche« eines n-dimensionalen Würfels ist nichts weniger als ein kompletter Würfel der nächstniederen Dimension $n-1$. Die Vorlagen zu diesem Bild stammen aus dem Buch »Discovering Rhombic Polyhedra No. 3« von Naoki Yoshimoto.



GRAFIK: KATSUYA KATO, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, MIT FRDL. GEN. VON CASPAR SCHWABE

In den niedrigdimensionalen Räumen, mit denen wir vertraut sind, lässt sich diese Frage sehr einfach beantworten (Bilder rechts). Ganz unten in dieser Hierarchie befindet sich die eher langweilige Dimension 1. Eine 1-Kugel mit $r = 1$ und ein 1-Würfel mit $s = 2$ sind ein und dasselbe Objekt – eine Strecke der Länge 2. In der Dimension 1 füllt die Kugel also den Würfel komplett aus, das Volumenverhältnis ist genau 1,0.

In Dimension 2 ist eine Kugel in einem Würfel nichts anderes als eine Kreisscheibe in einem Quadrat; also kann sich eine der Formeln aus meiner Schulzeit nützlich machen. Für $r = 1$ ergibt die Flächeninhaltsformel πr^2 den Wert π, während für den Inhalt der Quadratfläche $s^2 = 4$ gilt. Das Verhältnis dieser beiden Zahlen beträgt etwa 0,79. In drei Dimensionen ergibt sich für das Volumen der Kugel (4/3) π und für das des Würfels 8; das macht ein Verhältnis von ungefähr 0,52.

Die unglaubliche schrumpfende *n*-Kugel

Es sieht so aus, als würde die Kugel mit zunehmendem n einen immer kleineren Teil des Würfels ausfüllen. Es gibt auch einen einleuchtenden Grund dafür, warum sich diese Tendenz fortsetzen sollte: Die von der Kugel nicht bedeckten Bereiche des Würfels liegen in dessen Ecken. Wächst n um 1, dann verdoppelt sich die Zahl der Ecken. Es ist also zu erwarten, dass die Kugel einen zunehmenden Teil des Würfelvolumens – nämlich den in der Nähe der Ecken – nicht mehr erreicht.

Wer es genauer wissen will, muss die Volumina für $n > 3$ ausrechnen. Für den Würfel ist das nicht schwierig: Ein n-Würfel der Kantenlänge s hat das Volumen s^n; einer, in den eine Einheitskugel passt, muss die Kantenlänge 2 und damit das Volumen 2^n haben.

Wie aber steht es mit der n-Kugel? Wie schon erwähnt hat mich meine Schulbildung nicht mit den dafür nötigen Formeln ausgerüstet, aber nach wenigen Klicks liefert Wikipedia (in der deutschen Version unter »Kugel«) die gesuchte Volumenformel:

$$V(n,r) = \frac{\pi^{\frac{n}{2}} r^n}{\Gamma\left(\frac{n}{2}+1\right)}$$

Das Einzige, was in ihr über den Schulstoff hinausgeht, ist die Gammafunktion Γ. Das ist eine Verallgemeinerung der Funktion, die man mit dem Ausrufezeichen schreibt und »Fakultät« nennt. Es gilt $\Gamma(n+1) = n! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \ldots \cdot n$ für jede natürliche Zahl n. Im Unterschied zur Fakultät ist die Gammafunktion aber nicht nur für natürliche Zahlen, sondern für jede reelle Zahl definiert; zum Beispiel ist $\Gamma(1/2) = \sqrt{\pi}$.

Kaum hatte ich die Formel gefunden, wollte ich sie ausprobieren. Also schrieb ich ein einzeiliges Programm in der algebraischen Programmiersprache »Mathematica« und ließ mir eine Tabelle mit dem Volumen der Einheitskugel in verschiedenen Dimensionen ausgeben. Dabei hatte ich klare Erwartungen: Ich nahm an, dass das Volumen der Einheitskugel mit wachsendem n beständig größer würde, allerdings in geringerem Maß als das des Würfels mit $s = 2$, der sie genau umschließt. Das würde Bellmans Behauptung vom Fluch der Dimensionen bestätigen. Die ersten Tabellenwerte sahen auch entsprechend aus:

n	$V(n,1)$
1	2
2	$\pi \approx 3{,}1416$
3	$\frac{4}{3}\pi \approx 4{,}1888$
4	$\frac{1}{2}\pi^2 \approx 4{,}9348$
5	$\frac{8}{15}\pi^2 \approx 5{,}2638$

Vor allem waren die Werte für 1, 2 und 3 diejenigen, die ich bereits kannte – diese Art von Bestätigung ist immer eine Beruhigung, wenn ein Programm zum ersten Mal läuft. Außerdem wächst das Volumen mit zunehmendem n, aber zunehmend langsamer, genau wie erwartet.

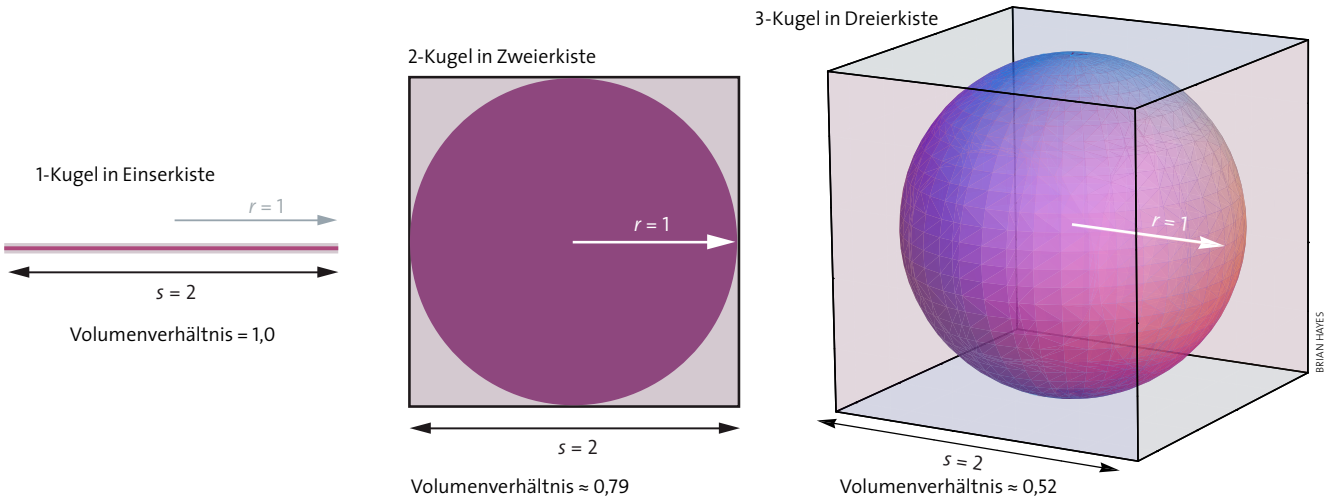
Dann allerdings fiel mein Blick auf die weiteren Tabellenzeilen:

n	$V(n,1)$
1	2
2	$\pi \approx 3{,}1416$
3	$\frac{4}{3}\pi \approx 4{,}1888$
4	$\frac{1}{2}\pi^2 \approx 4{,}9348$
5	$\frac{8}{15}\pi^2 \approx 5{,}2638$
6	$\frac{1}{6}\pi^3 \approx 5{,}1677$
7	$\frac{16}{105}\pi^3 \approx 4{,}7248$
8	$\frac{1}{24}\pi^4 \approx 4{,}0587$
9	$\frac{32}{945}\pi^4 \approx 3{,}2985$
10	$\frac{1}{120}\pi^5 \approx 2{,}5502$

Von Dimension 5 an nimmt das Volumen der Einheits-n-Kugel mit wachsendem n ab! Ich versuchte es noch mit einigen größeren Werten für n und lernte, dass V(20,1) ungefähr 0,0258 ist und V(100,1) in der Nähe von 10^{-40} liegt. Das sieht ganz so aus, als würde sich die n-Kugel für n gegen unendlich ins Nichts verkrümeln!

Doppelt verflucht

Ich hatte immer gedacht, ich hätte Bellmans Fluch verstanden. Sowohl die n-Kugel als auch der n-Würfel werden mit zunehmendem n immer größer, aber der Würfel wächst schneller. Es ist aber noch viel schlimmer: Während der Würfel sich exponentiell ausdehnt, schrumpft die Kugel nicht nur relativ, sondern auch absolut zur Bedeutungslosigkeit zusammen. Im 100-dimensionalen Raum ist das Verhältnis von Kugel- zu Würfelvolumen auf den Wert $1{,}8 \cdot 10^{-70}$ gefallen. Das ist deutlich kleiner als das Verhältnis vom Volumen eines Atoms zu dem der Erde. Die Kugel in der Kiste ist so gut



Packt man eine Kugel mit Radius 1 in eine würfelförmige Kiste der (kleinstmöglichen) Kantenlänge 2, so nimmt die Kugel mit zunehmender Dimension einen immer kleineren Anteil des Würfelvolumens ein. Bei der Dimension 100 ist dieser Anteil auf unvorstellbar winzige $1{,}8 \cdot 10^{-70}$ geschrumpft.

wie verschwunden. Wenn man zufällig eine Billion Punkte im Innern des Würfels wählt, dann ist die Wahrscheinlichkeit dafür, auch nur mit einem davon die Kugel zu treffen, praktisch null.

Wohlgemerkt: Die fragliche Kugel ist nach wie vor die größte, die überhaupt in den Würfel hineinpasst. Wir sprechen nicht über eine einsame Erbse, die lose in einer Tiefkühlpackung klappert. Der Durchmesser der Kugel stimmt genau mit der Kantenlänge des Würfels überein, und ihre Oberfläche berührt jede seiner Seiten. (Eine Seite des n-Würfels ist ein $(n-1)$-Würfel, siehe auch Bild S. 53.) Die Kugel sitzt absolut stramm in der Kiste – wäre sie nur eine Winzigkeit größer, würde sie den Behälter an allen Seiten ausbeulen. Nach Volumen gemessen existiert sie jedoch kaum – wie ein Schwarzes Loch, das durch den Kollaps seiner gewaltigen Masse nur noch einen Punkt im Raum einnimmt.

Lässt sich dieses Paradoxon irgendwie begreiflich machen? Nun, man kann es immerhin ein bisschen ausmalen. Hier mein erster Vorschlag. Die Kugel füllt zwar die Mitte des Würfels vollständig, nur hat der Würfel nicht viel Mitte. Fast sein gesamtes Volumen sitzt »außen«, sozusagen in den Ecken. Das sieht man durch simples Abzählen: Die Kugel berührt jede Seite des Würfels in deren Mittelpunkt, reicht aber in keine seiner Ecken. Ein 100-Würfel hat gerade einmal 200 Seiten, aber 2^{100} Ecken!

Aber man weiß doch, dass die Kugel in der Mitte vom Würfel sitzt! Statt per Zufall nach ihr zu suchen, kann man es doch so einrichten, dass sie mit Sicherheit getroffen wird. Das führt auf die zweite Idee: Man steche in Gedanken Spieße durch den gemeinsamen Mittelpunkt von Kugel und Würfel. Damit trifft man zwar mit Sicherheit die Kugel, doch selbst mit dieser massiven Nachhilfe hat die Kugel nicht viel Anteil an der Spießlänge.

Zwar gehen die kürzesten Spieße vom Mittelpunkt einer Würfelseite zu dem der gegenüberliegenden Würfelseite. Sie haben damit die Länge 2, was gleich der Kantenlänge des Würfels und dem Durchmesser der Kugel ist, und liegen komplett innerhalb der Kugel. Andererseits verlaufen die längsten Spieße zwischen zwei einander diagonal gegenüberliegenden Eckpunkten des Würfels. In einem n-Würfel der Kantenlänge $s = 2$ ist der Abstand dieser Punkte $2\sqrt{n}$. In dem 100-Würfel, der eine Einheitskugel derselben Dimension einschließt, hat der längste Durchmesser also die Länge 20. Nur ein Zehntel dieses Spießes befindet sich innerhalb der Kugel. Außerdem gibt es insgesamt nur 100 kürzeste Spieße, aber 2^{99} längste.

Die dritte und verblüffendste Idee verdanke ich dem Wissenschaftsjournalisten Barry Cipra. In der Ebene passen in ein Quadrat der Kantenlänge 4 vier Einheitskreise, angeordnet in zwei Zeilen und zwei Spalten. In der Mitte bleibt dabei noch Platz für eine kleinere Kreisscheibe vom Radius $\sqrt{2}-1$. In drei Dimensionen fasst der entsprechende 3-Würfel acht Einheits-3-Kugeln und eine zusätzliche neunte vom Radius $\sqrt{3}-1$ in der Mitte. Allgemein kann man einen n-Würfel der Kantenlänge 4 stramm mit 2^n Einheits-n-Kugeln füllen, wenn die säuberlich – entlang jeder Dimension immer zwei nebeneinander – angeordnet sind. In die Mitte passt dann noch eine zusätzliche Kugel mit Radius $\sqrt{n}-1$.

Sehen wir uns an, was bei $n = 9$ geschieht. Die »kleinere« Kugel in der Mitte hat jetzt den Radius 2, das ist doppelt so viel wie die $2^9 = 512$ sie umgebenden. Außerdem stößt sie an jede Seite des umgebenden Würfels an. Nimmt die Dimension weiter zu, dann sprengt die »kleine« Mittelpunktskugel die Kiste!

Warum ausgerechnet Dimension 5?

Dass das Volumen der Einheits-n-Kugel für n gegen unendlich gegen null strebt, war schon eine Überraschung. Aber noch erstaunlicher fand ich die Tatsache, dass es nicht monoton von der Dimension abhängt (Bilder S. 57 oben). Es ist schwer genug zu glauben, dass das Volumen für große Dimensionen immer kleiner wird; aber wieso wird es anfangs größer, so dass es zwischendurch ein Maximum annimmt?

Was ist so speziell am fünfdimensionalen Raum, dass sich die Einheitskugel darin breiter macht als in jeder anderen Dimension?

Ich kann eine Antwort anbieten, die leider in Wirklichkeit nicht viel erklärt: Alles hängt mit dem Wert von π zusammen. Weil π etwas größer als 3 ist, wird das maximale Volumen in Dimension 5 erreicht; wäre π zum Beispiel 17, würde das Volumen sein Maximum in der Dimension 33 annehmen.

Wie das? Schauen wir uns die Formel für das Volumen der n-Kugel genauer an. Da wir uns nur für Einheitskugeln interessieren, ist stets $r = 1$, und wir können den Term r^n ignorieren. Damit bleibt die Potenz von π im Zähler und die Gammafunktion im Nenner. Betrachten wir nur gerade Werte für n, dann ist $n/2$ immer eine natürliche Zahl, und wir können die Gammafunktion durch die Fakultät ersetzen. Zur Abkürzung setzen wir $m = n/2$; dann nimmt die Volumenformel die Gestalt $\pi^m/m!$ an.

Daraus entnehmen wir, dass das Volumen der Einheits-n-Kugel durch einen Wettlauf zwischen π^m und $m!$ bestimmt ist. Anfangs, für kleine Werte von m, hat π^m die Nase vorn; für $m = 2$ zum Beispiel ist $\pi^2 \approx 10$ und damit größer als $2! = 2$. Im weiteren Verlauf aber gewinnt unweigerlich $m!$ das Rennen. Sowohl π^m als auch $m!$ sind Produkte von m Faktoren; in π^m sind diese Faktoren aber alle gleich π, während sie in $m!$ alle Werte von 1 bis m annehmen. Für $m = 7$ ist $m!$ erstmals größer als π^m. Von da ab wachsen die Fakultäten viel schneller als die Potenzen von π.

Diese vereinfachte Analyse erfasst bereits die wesentlichen Merkmale der Volumenkurve. Das Volumen einer Einheitskugel strebt mit wachsender Dimension gegen null, weil das Verhältnis $\pi^m/m!$ den Grenzwert null hat. Andererseits wächst dieser Quotient in niedrigen Dimensionen mit zunehmendem m. Also muss er unterwegs ein Maximum annehmen.

Um dessen genaue Lage herauszufinden, kehren wir zur ursprünglichen Gestalt der Formel zurück. Da die Gammafunktion für jede reelle Zahl definiert ist, haben wir sogar die Freiheit, die Dimension als stetige Variable zu behandeln, die jeden reellen Wert annehmen kann. Mit klassischer Analysis – Nullstelle der Ableitung suchen – fand ich das Maximum der Volumenkurve bei $n \approx 5{,}2569464$; an dieser Stelle hat die Einheitskugel ungefähr das Volumen 5,2777680.

Mit einer eng verwandten Formel können wir auch die Oberfläche der n-Kugel berechnen. Diese Größe erreicht ebenfalls einen Gipfelwert und fällt von da ab gegen null. Das Maximum liegt bei $n \approx 7{,}2569464$; der Oberflächeninhalt erreicht also sein Maximum genau zwei Dimensionen später als das Volumen.

Die Dimensionen des Problems

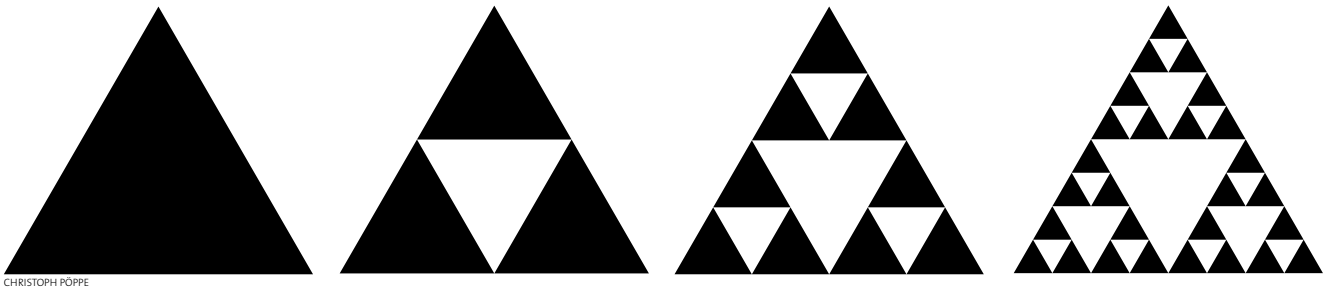
Das alles auszurechnen, ist nicht schwer, eine Bedeutung hinter den Ergebnissen zu finden, dagegen sehr. Ich kann – durch Vergleich der Potenzen von π mit Fakultäten – einsehen, warum das Volumen der Einheitskugel sein Maximum bei $m = 5$ erreicht. Aber ich habe kein Gefühl für den fünfdimensionalen Raum, das mir diese Tatsache einleuchtend erscheinen ließe, von einer Vorstellung ganz zu schweigen.

Dass das Maximum nun auch noch bei einer nicht ganzzahligen Dimension erreicht wird, ist vollends widersinnig. Es gibt zwar den Begriff der fraktalen Dimension, die auch krumme Werte annehmen darf, aber das betrifft Objekte – eben die Fraktale –, nicht ganze Räume. Ein klassisches Fraktal ist das Sierpinski-Dreieck (Bild unten): Nimm aus der Mitte eines gleichseitigen Dreiecks eines mit der halben Seitenlänge weg, so dass drei kleinere übrig bleiben; verfahre mit den kleinen Dreiecken in derselben Weise, und so weiter. Das resultierende Fraktal hat die Dimension 1,585; es liegt jedoch in einer zweidimensionalen Ebene. Aber ein Raum mit 5,2569464 Koordinatenachsen, deren jede auf allen anderen senkrecht steht? Das ist nicht nur unvorstellbar, sondern schlechterdings absurd.

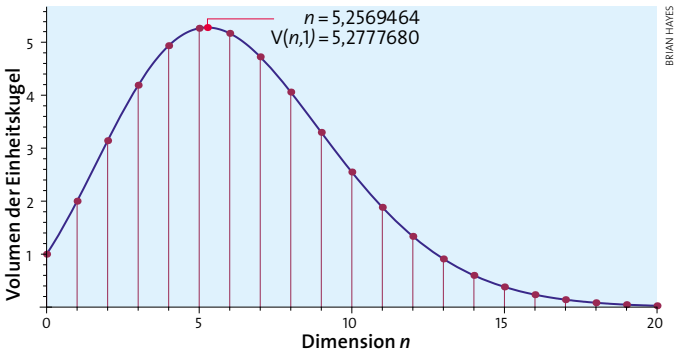
Überhaupt: Kann man die Volumina von Körpern vergleichen, die in verschiedenen Dimensionen leben? Was ist größer: eine Kreisscheibe mit einem Flächeninhalt von zehn Quadratzentimetern oder eine Kugel mit einem Volumen von fünf Kubikzentimetern? Die Frage zu stellen, scheint noch weitaus sinnloser, als Äpfel mit Birnen zu vergleichen – zunächst.

Ich glaube gegen den ersten Anschein, dass es sehr wohl eine vernünftige Basis für solche Vergleiche gibt. Volumen ist nämlich in jeder Dimension durch den Vergleich mit einem Standardobjekt dieser Dimension definiert. Das ist üblicherweise der Einheitswürfel, der daher manchmal auch als »Maßpolytop« bezeichnet wird. Er erstreckt sich in jeder Koordinatenrichtung von 0 bis 1 und hat definitionsgemäß in

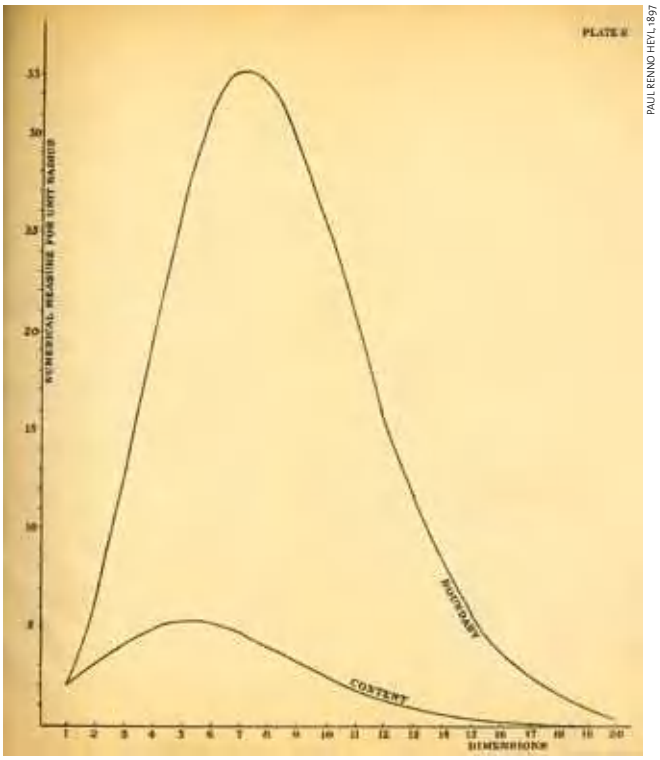
Das Sierpinski-Dreieck ist der Grenzwert einer unendlichen Folge von Prozessen, die jeweils aus allen Dreiecken das mittlere Viertel wegnehmen.



CHRISTOPH PÖPPE



BRIAN HAYES



PAUL RENNO HEYL, 1897

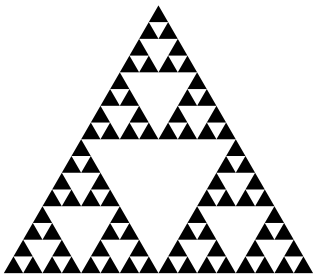
Das Volumen der Einheitskugel in Dimension *n* nimmt bis zur Dimension *n* = 5 mit wachsendem *n* zu und danach ab, um schließlich gegen null zu streben, wenn *n* gegen unendlich geht. Werden als Werte für die Dimension auch reelle Zahlen zugelassen, dann wird das maximale Volumen für *n* ≈ 5,2569464 (oben, roter Punkt) erreicht. Diese Kurve für das Volumen (content) sowie die für den Oberflächeninhalt (boundary) hatte Paul Renno Heyl bereits 1897 gefunden. Die Grafik rechts stammt aus seiner Dissertation »Properties of the locus *r* = constant in space of *n* dimensions«.

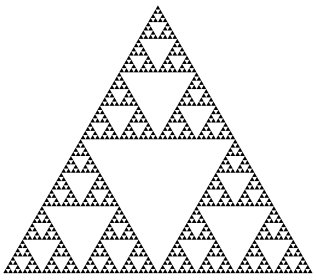
jeder Dimension das Volumen 1. Bei $n = 1$ ist die Einheitskugel größer als der Einheitswürfel (und sie passt auch in keiner Dimension in den Einheitswürfel hinein, denn der hat nur Kantenlänge 1, während die Kugel eine Kiste der Kantenlänge 2 benötigt); das Verhältnis ihrer Volumina wächst bis $n = 5$ und wird ab da immer kleiner. Um ebendieses sich ändernde Verhältnis von Einheitskugel- zu Einheitswürfelvolumen geht es in unserer Diskussion.

Zwiebeln schneiden

In der Schule waren die Volumenformeln eher so etwas wie Beschwörungsformeln, die man auswendig lernen und aufsagen, aber nicht unbedingt verstehen sollte. Heute möchte ich mich damit nicht mehr zufriedengeben. Ich kann zwar die Formel für die *n*-Kugel hier nicht vollständig herleiten, möchte aber doch einen Eindruck vermitteln.

Die entscheidende Idee besteht in der Feststellung, dass eine *n*-Kugel aus unendlich vielen $(n-1)$-Kugeln zusammengesetzt ist. Das sieht jeder, der eine Zwiebel in Scheiben schneidet. Noch besser geeignet sind andere annähernd kugelförmige Feldfrüchte wie Radieschen oder Rote Bete; man muss nicht so weinen, und die Scheiben zerfallen nicht in Zwiebelringe, auf die es hier nicht ankommt.





Jede Scheibe ist eine 2-Kugel. Die zerschneiden wir weiter in Streifen (1-Kugeln) und diese in winzige Würfel (0-Kugeln). Mit echtem Gemüse und echten Messern erhält man natürlich nur genäherte Ergebnisse, aber in der mathematischen Küche funktioniert das Verfahren perfekt. Vor allem produziert es unendlich viele unendlich dünne Scheiben.

Die Idee führt zu einem rekursiven Algorithmus für die Berechnung des Volumens der *n*-Kugel: Zerschneide sie in sehr viele $(n-1)$-Kugeln und addiere die Volumina dieser Scheiben. Wie berechnet man das Volumen einer Scheibe? Mit demselben Verfahren. Zerschneide also jede $(n-1)$-Kugel in $(n-2)$-Kugeln, und so weiter. Das Verfahren endet schließlich bei $n = 1$ und $n = 0$, wo die Antworten ja bekannt sind. Das Volumen der 1-Kugel vom Radius *r* ist $2r$, der 0-Kugel weist man das Volumen 1 zu. Lässt man die Dicke der Scheiben gegen null streben, dann verwandelt sich die Summe in ein Integral und führt auf das exakte Resultat.

Für die tatsächliche Berechnung ist es bequemer, eine etwas andere Rekursion mit der Schrittweite 2 zu verwenden. Das heißt, man berechnet das Volumen der *n*-Kugel aus dem einer $(n-2)$-Kugel. Das Ergebnis lautet: Das Volumen der *n*-Kugel ist gleich $2\pi r^{2/n}$ mal dem Volumen der $(n-2)$-Kugel.

Damit kann man das Volumen der *n*-Kugel berechnen, indem man in Zweierschritten absteigt (bei jedem Schritt kommt der entsprechende Faktor hinzu), bis man bei $n = 1$ beziehungsweise $n = 0$ ankommt. Das ergibt für gerades *n*

$$1 \cdot \frac{2\pi r^2}{2} \cdot \frac{2\pi r^2}{4} \cdot \frac{2\pi r^2}{6} \cdot \ldots \cdot \frac{2\pi r^2}{n}$$

und für ungerades n

$$2r \cdot \frac{2\pi r^2}{3} \cdot \frac{2\pi r^2}{5} \cdot \frac{2\pi r^2}{7} \cdot \ldots \cdot \frac{2\pi r^2}{n} \quad .$$

Das Ergebnis ist für jede natürliche Zahl n das, was auch die Formel mit der Gammafunktion liefert.

Wer war's?

Auf die Frage, wer die Formel für das Volumen der n-Kugel zuerst aufgeschrieben hat, kenne ich keine gesicherte Antwort. Ich habe eine lange Kette von Verweisen zurückverfolgt, bin aber nicht sicher, ob ich an den tatsächlichen Ursprung gelangt bin.

Über die »On-Line Encyclopedia of Integer Sequences« (http://oeis.org), eine gigantische Materialsammlung von Folgen ganzer Zahlen, die wir Neil J. A. Sloane verdanken, und das Buch »Sphere Packings, Lattices, and Groups« von John Horton Conway and Sloane fand ich »An Introduction to the Geometry of *N* Dimensions« von Duncan Sommerville, veröffentlicht 1929. Sommerville, ein schottischer Mathematiker, der 1915 nach Neuseeland emigrierte, widmet der Formel für die n-Kugel einige Seiten und bringt auch eine Tabelle mit den Werten für die Dimensionen 1 bis 7. Allerdings sagt er wenig über ihre Herkunft.

Sommerville hat allerdings auch eine Bibliografie für nichteuklidische und n-dimensionale Geometrie veröffentlicht. Dort finden sich fünf Arbeiten über »Volumen und Oberfläche von Hypersphären«; die älteste aus dem Jahr 1866 stammt von William Kingdon Clifford, einem früh verstorbenen, genialen englischen Geometer. Clifford hat die Formel offenbar selbst hergeleitet; er war aber nicht der Erste.

An anderer Stelle erwähnt Sommerville den Schweizer Mathematiker Ludwig Schläfli (1814–1895) als einen Pionier der n-dimensionalen Geometrie. Schläflis in den frühen 1850er Jahren geschriebene Abhandlung zu diesem Thema wurde erst 1901 vollständig gedruckt, ein von Arthur Cayley ins Englische übersetzter Auszug erschien jedoch bereits 1858. Dessen erster Absatz enthält die Volumenformel für die n-Kugel und fügt hinzu, sie sei »vor langer Zeit« gefunden worden. In einer Fußnote zitiert Schläfli Arbeiten des belgischen Mathematikers Eugène Catalan (1814–1894) aus den Jahren 1839 und 1841. Beim Nachschauen stellt sich heraus, dass Catalan nicht die vollständige Volumenformel veröffentlicht hat, ihr aber ziemlich nahekam. Ihm gebührt also zumindest ein Teil der Ehre.

Keine dieser frühen Arbeiten beschäftigt sich mit den Konsequenzen der Formel: dem Maximum bei $n = 5$ oder dem Verschwinden für n gegen unendlich. Zu diesem Thema verweist Sommervilles Bibliografie nur auf die Dissertation eines Paul Renno Heyl, veröffentlicht 1897 von der University of Pennsylvania. Ich hatte kaum Hoffnung, diesen Text noch zu finden; aber die Bibliothekare der Harvard University machten ein Exemplar in einem Kellerregal ausfindig. Erst später erfuhr ich, dass der komplette Text (ohne Illustrationen) von Google Books digitalisiert worden ist.

Nach seiner Promotion arbeitete Heyl beim National Bureau of Standards. Er machte sich auch einen Namen als Verfasser wissenschaftlicher, philosophischer und religiöser Werke. Sein bekanntestes Buch war »The Mystery of Evil« von 1920, das heute noch im Handel ist.

In seiner Dissertation leitet Heyl sowohl die Formel für das Volumen als auch die für den Oberflächeninhalt her. Er diskutiert auf scharfsinnige Weise die mehrdimensionale Geometrie im Allgemeinen und kommt zu dem verwirrenden Schluss, dass die Einheitskugel »in einem Raum unendlicher Dimension überhaupt keinen Inhalt haben kann«. Überlassen wir Heyl die abschließenden Worte zu unserem Thema: »Man wird uns vielleicht die Annahme verzeihen, dass, wenn irgendwo, das Absolute und Unbedingte in einem Raum unendlicher Dimension zu finden sein sollte, aber wir sind zu einer gegenteiligen Schlussfolgerung gelangt. Es ist das Merkwürdigste, von dem ich in der Wunderwelt Höherer Räume weiß.« ~

DER AUTOR

Brian Hayes ist Verfasser der Kolumne »Computing Science« im »American Scientist«, aus dem dieser Artikel stammt. In seinem Blog **http://bit-player.org** präsentiert er unter anderem ergänzendes Material zu seinen Kolumnen.

QUELLEN

Catalan, E.: Mémoire sur la réduction d'une classe d'intégrales multiples. In: Journal de Mathématiques Pures et Appliquées 4, S. 323–344, 1839
Catalan, E.: Théorème sur la réduction d'une intégrale multiple. In: Journal de Mathématiques Pures et Appliquées 6, S. 81–84, 1841
Cipra, B.: Disproving the Obvious in Higher Dimensions. In: Cipra, B.: What's Happening in the Mathematical Sciences 1. American Mathematical Society, Providence (RI) 1993, S. 21–25
Clifford, W.K.: Question 1878. In: Mathematical Questions, with Their Solutions, from the »Educational Times« 6, 1866, S. 83–87
Conway, J.H., Sloane, N.J.A.: Sphere Packings, Lattices, and Groups. Springer, New York, 3. Auflage 1999
Schläfli, L.: Theorie der vielfachen Kontinuität. Zürcher und Furrer, Zürich 1901. Nachgedruckt in: Ludwig Schläfli, 1814–1895, Gesammelte Mathematische Abhandlungen, Vol. I, Birkhäuser, Basel 1950, S. 167–387
Sommerville, D.M.Y.: Bibliography of Non-Euclidean Geometry, Including the Theory of Parallels, the Foundation of Geometry, and Space of *N* Dimensions. Harrison & Sons, London 1911
Sommerville, D.M.Y.: An Introduction to the Geometry of *N* Dimensions. Dover Publications, New York 1929

WEBLINKS

http://oeis.org
Englischsprachige Enzyklopädie von Folgen ganzer Zahlen, von Neil A. J. Sloane

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1155302**

© American Scientist
www.americanscientist.org

IN EIGENER SACHE

Nehmen Sie uns mit!

Ausgewählte Publikationen für Tablet-PCs

UNSERE KIOSK-APP

Sie möchten Magazine aus unserem Verlag unterwegs lesen, aber das gedruckte Heft lieber zu Hause lassen? Kein Problem: Wir bieten Ihnen mit unserer Kiosk-App eine Auswahl unserer Publikationen für das iPad und Android-Tablets an. Mit **Spektrum neo** reisen Sie in die Zukunft und ins Universum – oder staunen Sie in **epoc – Albrecht Dürer** über kleinste Details in seinen fantastischen Bildern. Die Ausgaben enthalten alle Artikel der Druckversion plus weiterführende Links, Bildergalerien oder auch kurze Videosequenzen. Weitere Titel zu spannenden Themen sind in Vorbereitung.

www.spektrum.com/kioskapp

ARCHÄOLOGIE IN AFRIKA

Königreiche der Sklaverei

Siedlungen wuchsen zu Städten heran und Königtümer zu mächtigen Reichen: An der Küste Westafrikas setzte der transatlantische Sklavenhandel seit dem 16. Jahrhundert gewaltige gesellschaftliche Veränderungen in Gang.

Von James Cameron Monroe

Als die ersten Europäer Westafrikas Küsten anliefen, war der Boden für den Handel mit Menschen längst bereitet: Kriege gehörten zum Alltag, und wer in Gefangenschaft geriet, wurde versklavt oder den Ahnen geopfert. Die Beute nun den weißhäutigen Fremden im Tausch zu überlassen – warum nicht, wenn es sich lohnte, wenn die exotischen Waren das Prestige der siegreichen Anführer mehrten? Doch aus gelegentlichen Geschäften entwickelte sich bald ein florierender Handel, denn der Bedarf an Arbeitskräften in den Kolonien der Neuen Welt schien nicht enden zu wollen. Das erforderte feste Handelsstationen an der Küste – die heutige Stadt Grand-Popo an der Grenze zwischen Benin und Togo ist aus einer portugiesischen Niederlassung entstanden. Notwendig war aber auch die Professionalisierung seitens der Lieferanten – und das sollte die Machtverhältnisse vollkommen verschieben und die Bildung zentral regierter Staaten fördern.

Wie drastisch der Menschenhandel Westafrika vom 17. bis 19. Jahrhundert verändert hat, untersuchen meine Kollegen und ich seit dem Jahr 2000 im Rahmen des Abomey Plateau Archaeological Project. Das namensgebende Hochland war während dieser so genannten Atlantischen Epoche das Kernland des Königreichs Dahomey, das 1975 großenteils in der Republik Benin aufging. Seine Geschichte lässt sich aber nicht untersuchen, ohne auch die seiner Vorgänger und Konkurrenten Allada und Hueda im Blick zu haben. Für unsere Forschung kombinieren wir zudem erstmals drei verschiedene Informationsquellen: Historiker werten schriftliche Berichte europäischer Augenzeugen aus; Ethnologen ergänzen diese anhand einheimischer Überlieferungen; und Archäologen erheben durch systematische Begehungen und gezielte Grabungen Daten zur Flächennutzung.

Unser Untersuchungsgebiet ist der Dahomey-Gap, ein Abschnitt der auch als »Sklavenküste« bekannten Bucht von Benin im Golf von Guinea (siehe Karte S. 62). Dieser Korridor unterbricht Westafrikas Gürtel des tropischen Regenwalds durch eine Savannenlandschaft mit Waldinseln, Sümpfen und Lagunen entlang der Küste. Letztere lieferten nicht nur Fisch und Frischwasser, sondern dienten auch als Wegenetz. Von den Lagunen aus war zwar das Meer erreichbar, doch gefährlicher Wellengang und Haie machten die Küstenfischerei wenig attraktiv. Die Flüsse, welche die Lagunen speisen, durchschneiden sieben Plateaus, die von der Küstenebene auf 20 bis 200 Meter über dem Meeresspiegel ansteigen. Dort lebten vor der Atlantischen Epoche die meisten Menschen: Es gab fruchtbare Ackerböden, und man war fern von den Moskitos und den Krankheiten der Sumpfgebiete. Eine von tropischem Regenwald bewachsene »zentrale Senke« teilt das Hochland in zwei Bereiche.

Über die Zeit vor dem ersten Kontakt mit Europäern wissen wir nur wenig. Überlieferungen zufolge sollen Herrscher der Yoruba, einer in Nigeria beheimateten Sprachgruppe, im 13. bis 14. Jahrhundert auf ihren Kriegszügen Ortschaften im Dahomey-Korridor unterworfen, andere neu gegründet und so die Keimzellen der späteren Reiche geschaffen haben. Sicher ist: Als europäische Kaufleute und Militärs im 16. Jahrhundert Kontakt mit den Gemeinwesen des Inlands aufnahmen, existierten bereits etliche Siedlungen, einige davon den

AUF EINEN BLICK

BENINS BEWEGTE VERGANGENHEIT

1 Der als **Dahomey-Gap** bezeichnete Abschnitt der »Sklavenküste« in der Bucht von Benin avancierte im 17. Jahrhundert zu einem Umschlagplatz des transatlantischen Sklavenhandels.

2 Archäologen, Historiker und Ethnologen untersuchen gemeinsam die sozialen und politischen Folgen dieser Entwicklung. Offenbar wurden die von den Europäern eingetauschten Luxusgüter zu Symbolen der Macht, der Menschenhandel zum wichtigsten Wirtschaftszweig der drei **Königreiche Allada**, **Hueda** und **Dahomey**.

3 Mit der Ächtung des Sklavenhandels im 19. Jahrhundert waren die Reiche im Dahomey-Gap gezwungen, sich neu zu orientieren. Dahomey meisterte die Krise insbesondere durch den **Export von Palmöl** – mit weit reichenden sozialen Folgen.

Berichten nach mit städtischem Charakter. Gemäß der klassischen Definition urbaner Zentren wohnten dort also tausende Menschen, und eine Mauer grenzte ihr Gebiet nach außen hin ab. Ein jüngerer Ansatz, das Phänomen Stadt zu fassen, unterstreicht hingegen die funktionalen Aspekte von Urbanität: Danach dient eine Stadt als wirtschaftliches, politisches und kulturelles Zentrum für ihr Umland. Dieses Modell eignet sich besser, um die Veränderungen sichtbar zu machen, die der transatlantische Sklavenhandel mit sich brachte.

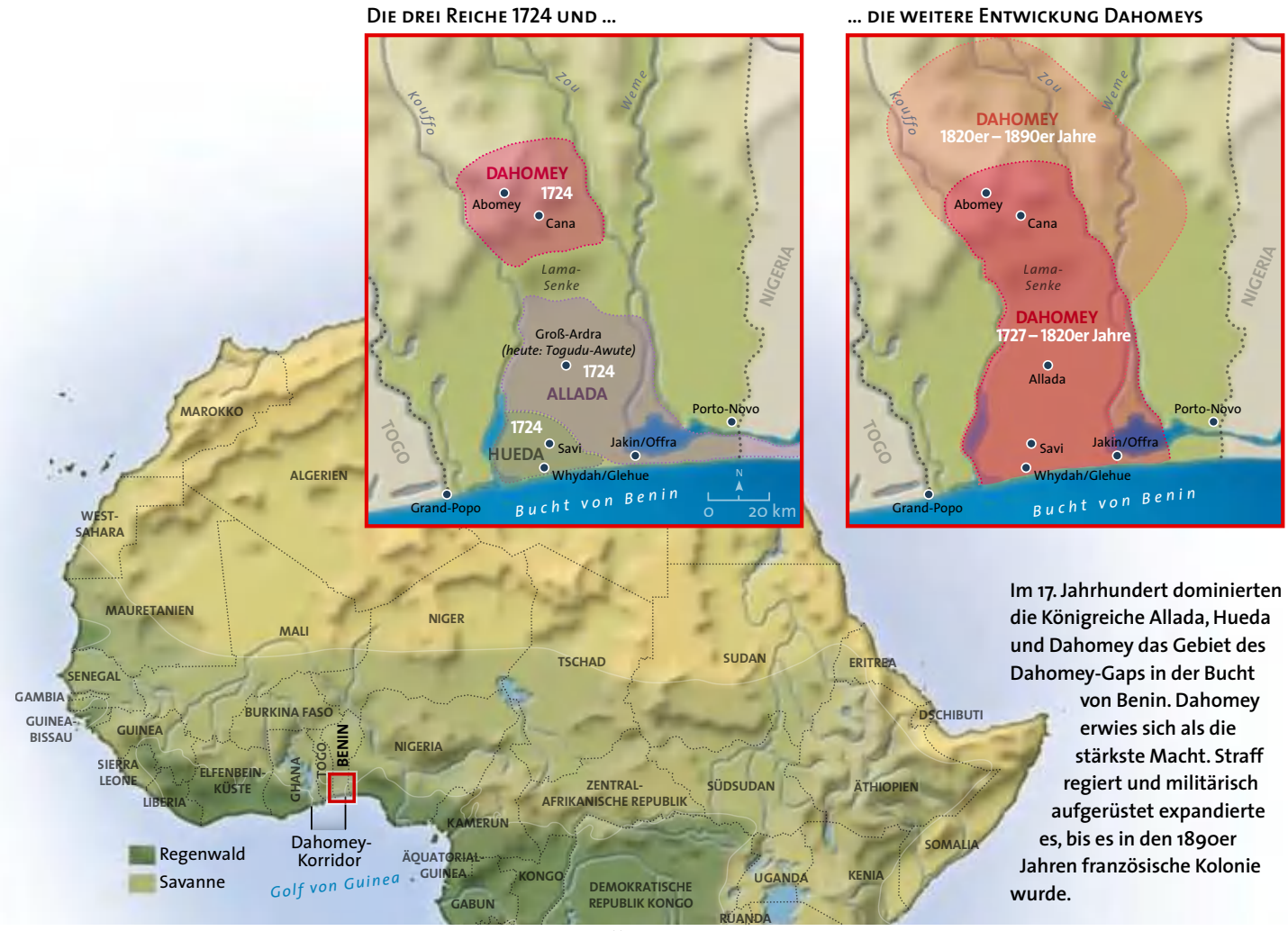
Der Historiker Isaac Adeagbo Akinjogbin (1930–2008) von der Obafemi Awolowo University in Ile-Ife (Nigeria) hat einmal geschätzt, dass während der Atlantischen Ära ungefähr 15 Königreiche im Korridor existierten, von denen vor allem die drei schon genannten an Bedeutung gewannen.

Allada wurde im Lauf des 16. Jahrhunderts gegründet. Der Gütertausch mit Königreichen der bewaldeten Küstenzone bildete den Grundstock seines Wachstums. Mitte des 16. Jahrhunderts, so berichten es Schriftquellen, trieben Portugiesen bereits Handel mit der Hauptstadt Groß-Ardra (heute Togudu-Awute). Experten schätzen ihre Einwohnerzahl für die Atlantische Zeit auf etwa 30 000. Insgesamt lebten in Allada wohl mehr als 200 000 Menschen, und zwar in »Städten und Dörfern in großer Anzahl«, wie der holländische Arzt Olfert Dapper 1668 schrieb. Zu seiner Zeit dominierte das Königreich den gesamten Süden des Dahomey-Korridors und konnte Tributzahlungen von kleineren Königreichen und Fürstentümern einfordern.

Der Archäologe und Historiker Alexis B. A. Adandé von der Université d' Abomey-Calavi in Benin leistete in den 1980er Jahren Pionierarbeit in dieser Region. Seine Grabungen und die Analyse der Überlieferungen bestätigten, dass die Stadt einst einen wichtigen Marktort darstellte, wo die Bewohner

Im 18. Jahrhundert existierte ein eingespieltes Netzwerk des Sklavenhandels: Afrikanische Könige schickten ihre Soldaten auf Menschenjagd, die Gefangenen wurden an europäische Seefahrer verkauft, die sie in die Kolonien der Neuen Welt exportierten. Dass Europäern das afrikanische Landesinnere weit gehend unbekannt war, illustriert diese Karte von 1743. Unten im Bild: das Königspaar von Hueda.

MIT FRDL. GEN. VON GEOGRAPHICUS RARE ANTIQUE MAPS, WWW.GEOGRAPHICUS.COM



Im 17. Jahrhundert dominierten die Königreiche Allada, Hueda und Dahomey das Gebiet des Dahomey-Gaps in der Bucht von Benin. Dahomey erwies sich als die stärkste Macht. Straff regiert und militärisch aufgerüstet expandierte es, bis es in den 1890er Jahren französische Kolonie wurde.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK, NACH LAW, R.: THE SLAVE COAST OF WEST AFRICA, 1550–1750 (...), CLARENDON PRESS, 1991, UND MANNING, P.: SLAVERY, COLONIALISM AND ECONOMIC GROWTH IN DAHOMEY, 1640–1960, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 1982

des Umlands jeden vierten Tag allerlei Güter wie Salz, Textilien oder Korbwaren feilboten. Mehr und mehr standen auch Gefangene zum Verkauf. Um 1680 dürften es schon bis zu 5000 pro Jahr gewesen sein, 30 Jahre später doppelt so viele. Hauptabnehmer waren Europäer, die mit Kaurischnecken bezahlten, der wichtigsten Währung in der Region, aber auch mit Textilien, Eisen- und Messingbarren, Gewehren und Alkohol. Archäologen entdeckten in den Siedlungsschichten später noch weitere Importwaren wie Glasperlen, Tabakspfeifen und Keramikgefäße.

Das Auftauchen solcher Objekte wirkte sich erheblich auf die Sozialstruktur aus. Zeitgenossen beschrieben, dass bei Krönungen oder bei Totenfeiern für verstorbene Herrscher große Mengen solcher Luxusgüter zur Schau gestellt und ausgewählten Personen überreicht wurden. Auf diese Weise demonstrierten die Herrscher ihre weltliche Macht wie auch ihre Stellung als lebender Gott und Mittler zur Welt der Ahnen. Die Importwaren avancierten damit zu Trägern symbolischer Bedeutung. Gleichzeitig sicherte ihre Weitergabe dem Regenten die Loyalität der Beschenkten und integrierte Fürsten des Umlands in das politische System Alladas.

Freilich versuchten die Potentaten, den Löwenanteil für sich zu behalten. Sie schickten nicht nur Militärexpeditionen auf Sklavenfang, sie verlangten auch von den Abnehmern, ausschließlich mit ihnen zu verhandeln (siehe Bilder rechts). Als Allada gegen Ende des 18. Jahrhunderts die immer noch wachsende Nachfrage an der Ware Mensch nicht mehr befriedigen konnten, witterte vor allem das küstennahe Hueda seine Chance, das mit der Stadt Glehue über einen sicheren Hafen verfügte.

Scherben im Radius von fünf Kilometern

Hueda wurde erstmals 1671 in einem Schriftstück erwähnt, als Franzosen in seiner Hauptstadt Savi einen Handelsposten gründeten. Auch dort lebten mindestens 30 000 Menschen; im gesamten Reich vermutlich mehr als 100 000. Der englische Sklavenhändler Robert Norris schrieb im 18. Jahrhundert: »Savi hatte einen Umfang von etwa vier Meilen. Die Häuser, aus Lehmwänden gebaut, waren mit Stroh bedeckt. Die Handelshäuser der europäischen Händler waren weitläufig und luftig, unterteilt in komfortable Wohnungen und auf der Außenseite umgeben von einer großen Galerie, die sich zu Balkonen hin öffnete. Die Stadt wimmelte derart von Menschen, dass es unmöglich war, ohne große Mühen durch die Straßen zu gehen.«

Der Archäologe Kenneth Kelly von der University of South Carolina in Columbia unternahm mit Studenten und einheimischen Kollegen erstmals 1991 systematische Oberflächenbegehungen (Surveys). Auf 2000 Hektar entdeckten die Forscher eine dichte Konzentration an Artefakten, vor allem an lokaler Keramik. Diese Fläche deuteten sie daher als urbanen Bereich. Im Zentrum trennten tiefe Gräben wohl einen 6,5 Hektar großen königlichen Bezirk ab, in dessen Mitte sich einst eine Palastanlage befunden hatte. Schriftquellen berichten, dass europäische Händler in Handelsniederlassungen innerhalb dieses abgegrenzten Bezirks leben mussten. Dort kamen dementsprechend viele Importgüter zu Tage, darunter holländische Tabakspfeifen, chinesisches Porzellan, Wein- und Schnapsflaschen und sogar holländische Ziegelsteine, eingelassen in die Böden. All dies fand sich aber nicht in den privaten Bereichen der Königsfamilie, sondern dort, wo der Regent Gäste empfing. Das unterstreicht den symbolischen Charakter der Objekte.

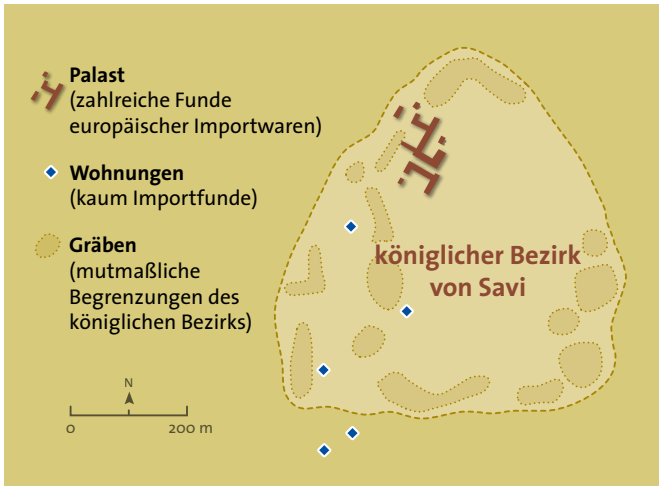
Kellys Schüler Neil Norman, heute am College of William and Mary in Virginia, untersucht seit 2005 das Umland von Savi. In einem Radius von fünf Kilometern fand er bei Surveys reichlich Scherben und andere Artefakte, zudem etliche Ruinen aus Lehmziegeln. Das bestätigt Berichte, nach denen auch das weitere Umfeld der Stadt dicht bewohnt war. Demnach hatte Hueda ein dreistufiges Siedlungsschema mit der Hauptstadt als politischem und wirtschaftlichem Zentrum, gefolgt von teilautonomen Provinzstädten mit einigen tausend Einwohnern und schließlich zahlreichen Dörfern, in denen jeweils wenige hundert Menschen lebten.

Manchen Europäern zufolge sicherte sich der König auch die Loyalität der Fürsten und Häuptlinge der ländlichen Regionen zu einem guten Teil mit geschenkten Importwaren. Solche Berichte müssen aber sehr kritisch gelesen werden, denn die Fremden durften sich kaum frei im Reich bewegen und kannten daher vor allem die Verhältnisse innerhalb der Palastmauern aus eigener Anschauung. So verwundert es nicht, dass Norman und sein Team solche Prestigeobjekte auf dem Land nur selten fanden. Daraus schließt der Forscher aber, dass der Königshof von Hueda sie für sich beansprucht hat. Vermutlich leistete das Spannungen zwischen

AUS LABAT, J.-B.: VOYAGE DU CHEVALIER DES MARCHAIS EN GUINÉE, ISLES VOISINES, ET À CAYENNE, FAIT EN 1725–27. AMSTERDAM 1731

Zeitgenössischen Berichten zufolge lebten Europäer in Savi, der Hauptstadt von Hueda, auf dem Palastgelände. So konnten die Herrscher verhindern, dass ihre Untertanen direkt mit den Fremden verhandelten. Ausgrabungen haben diese Nähe bestätigt. Importwaren wie holländische Ziegelsteine und chinesisches Porzellan (Foto unten links) fanden sich in Savi nur in bestimmten Bereichen des königlichen Palastes.

MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON NEIL NORMAN, COLLEGE OF WILLIAM AND MARY, WILLIAMSBURG



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK;
NACH KELLY, K.: WORLD ARCHAEOLOGY 28, S. 351–369, 1997

Zentrum und Umland Vorschub, die das Reich destabilisierten und seinem raschen Aufstieg ein ebenso schnelles Ende setzten.

Hueda konnte sich im Ringen um die Vorherrschaft im Sklavenhandel eines neuen Mitspielers nicht erwehren: Dahomey. Als Vasall von Allada hatte es sich über fast ein Jahrhundert hinweg auf dem Plateau von Abomey ausgebreitet, bis es 1716 stark genug war zu rebellieren. Der Krieg dauerte acht Jahre, dann fiel Allada, 1727 auch Hueda. Dahomey übernahm nun die Kontrolle über die Haupthandelsroute zur Küste. Um das Reich zu konsolidieren, setzten die Könige wieder auf Rituale, bei denen Prestigeobjekte zur Schau gestellt und verteilt wurden. Zudem aber investierten sie in ihre Armee und bauten eine straffe Verwaltung auf. Dieses Phänomen kennen Archäologen und Historiker gut: Auf diese Weise festigten Eliten immer wieder ihre Macht, und eine Stammesgemeinschaft wandelte sich zu einem Staat.

Auch die Hauptstadt Abomey entwickelte sich nun zu einer weitläufigen Siedlung für etwa 30 000 Menschen mit Marktplatz und Palastanlagen im Zentrum. Immerhin halb so groß wurde das nahe gelegene Cana (siehe Bilder unten rechts), das an überregionalen Handelswegen lag. Auf beide Städte zusammen entfiel gut ein Fünftel bis ein Drittel der Bevölkerung des Plateaus, der große Rest lebte in Dörfern und kleineren Städten, also Siedlungen, in denen zwischen einem Dutzend Familien und maximal 1000 Personen wohnten.

Archäologen erforschen diese ländlichen Gemeinschaften erst seit Kurzem. Einen besonderen Fund machte das Projet benino-danois d'archéologie (BDArch), das Klavs Randsborg von der Universität Kopenhagen und Alexis Adandé von der Université Nationale du Bénin leiten. Die Forscher entdeckten unterirdische Räume und Gänge, die mit Eisenwerkzeugen aus dem Gestein geschlagen geworden waren, meist mit einem schachtartigen Eingang. Die Anlagen stammen wohl aus dem späten 17. bis frühen 19. Jahrhundert. Vermutlich dienten sie als Wasserspeicher – und als Zuflucht, wenn Sklavenjäger unterwegs waren.

Blutiges Ritual für den König

Das Abomey Plateau Archaeological Project der University of California, das ich seit 2000 leite, widmet sich vor allem Palastanlagen, die im ganzen Reich zu finden sind. Insbesondere die des Königs in der Hauptstadt sollten natürlich die Autorität des Herrschers und seiner Familie sichtbar machen. Allein im zentralen Komplex lebten bis zu 8000 Menschen. Er spielte aber auch bei großen Zeremonien eine bedeutende

Wer hat, der hat: Exotische Objekte wie Steinschlösser für Vorderlader (oben links), Kaurimuscheln (oben Mitte), Ginflaschen (oben rechts), Perlen (unten links) und Tabakspfeifen (unten rechts, Fragmente) waren bei Dahomeys Eliten als Prestigeobjekte heiß begehrt. Die hier gezeigten Funde stammen aus der Stadt Cana, die von ihrer Lage am Knotenpunkt mehrerer Fernhandelsstraßen profitierte.

ALLE FOTOS: J. CAMERON MONROE

Rolle. Die wichtigsten waren die »Xwetanu«, die dem königlichen Ahnenkult dienten. Hunderte von Gefangenen verloren alljährlich dabei ihr Leben: Ihr Blut wurde mit Erde vermengt; aus diesem Lehm entstanden dann neue Mauern, die oft die Schädel erschlagener Feinde als makabre Zier trugen.

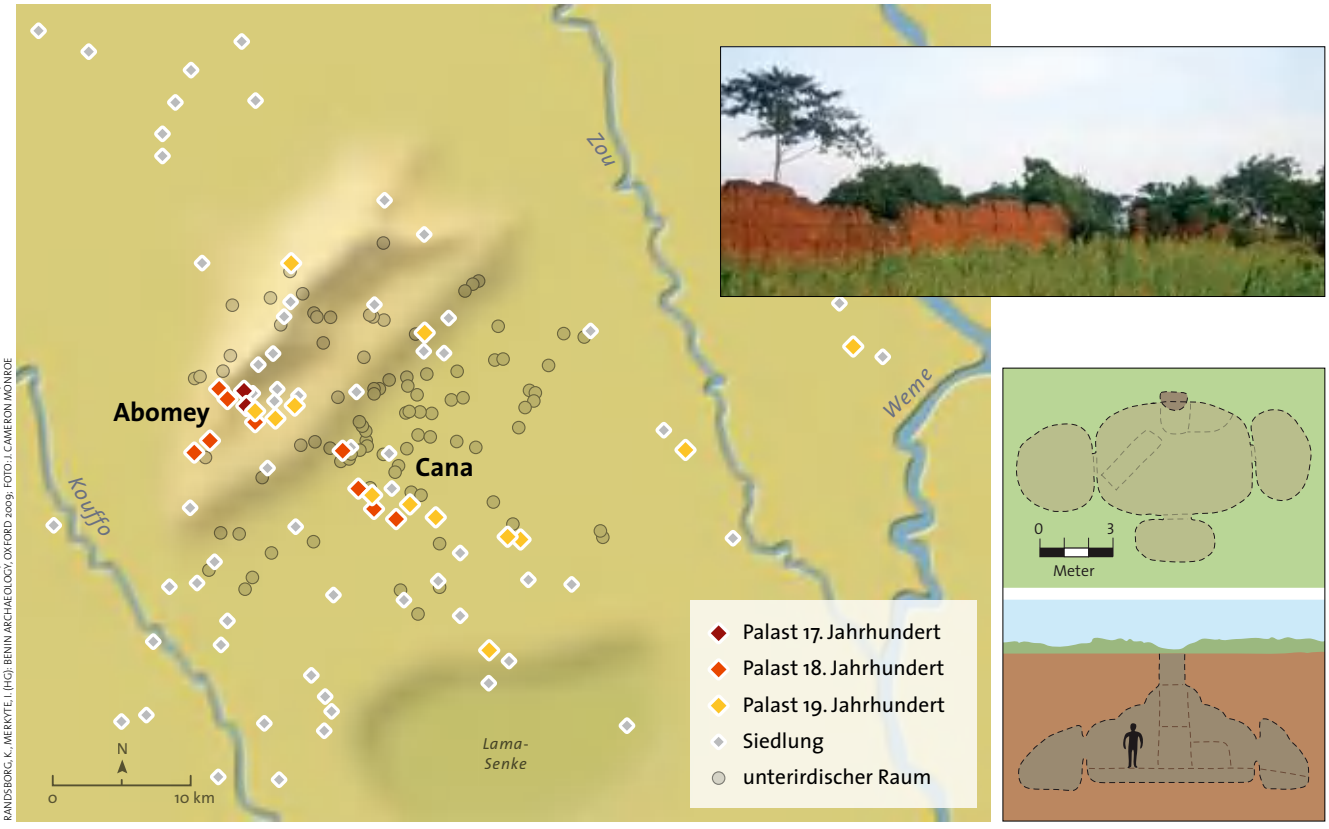
Meine archäologischen Untersuchungen in den Palästen von Cana unterstreichen die besondere Bedeutung dieser Stadt: So fanden sich verschiedene europäische Handelsgüter wie Tischgeschirr, Flaschen und Tabakspfeifen. Ganz anders verhielt es sich im Hinterland, was Oberflächenbegehungen und Testgrabungen kürzlich bewiesen. Wie zuvor in Hueda profitierten auch in Dahomey die kleineren Fürstentümer nicht vom Sklavenhandel.

Dennoch zog das keine Destabilisierung nach sich. Dafür sorgten wohl die über das Plateau verteilten Paläste, die als Zwischenstationen entlang der Handelsrouten und als militärische Stützpunkte dienten. Seit 2000 hat unser Projekt auf dem Plateau oder in seiner unmittelbaren Umgebung 19 davon identifiziert. Fragmente von Importgütern, einheimische Überlieferungen und europäische Berichte haben es ermöglicht, jede dieser Strukturen sowie die neun bereits aus der Hauptstadt bekannten Paläste auf zumindest ein Jahrzehnt genau zu datieren. Demnach entstanden die ersten kleineren Anlagen außerhalb Abomeys bald nach der Eroberung Alladas und Huedas. Sie wurden in Städten entlang der zur Küste führenden Haupthandelswege errichtet – offenbar um den Transport von Sklaven zu kontrollieren, sicher aber auch, um Aufstände in den eroberten Gebieten im Keim ersticken zu können. Im 19. Jahrhundert kamen dann weitere Paläste tief im Hinterland dazu, während in Abomey und Cana neue und größere als Verwaltungszentren gebaut wurden. Das Reich reagierte auf eine Entwicklung, die Westafrikas Staaten in ihren Grundfesten erschütterte: Die Ware Mensch ließ sich nicht mehr verkaufen.

Als erste Nation der Welt verbot Dänemark 1803 den Import von Sklaven, es folgten Großbritannien und die USA, 1836 dann Portugal als letztes europäisches Land. Mehr noch: Ab 1807 blockierten britische Kriegsschiffe Westafrikas Häfen für Sklavenschiffe, zeitweise unterstützt durch die US-Marine. Gleichzeitig ermunterten europäische Abgesandte die westafrikanischen Staaten, den Export landwirtschaftlicher Güter auszubauen. Vor allem die Nachfrage nach Palmöl wuchs, das als Rohstoff für Seifen, Kerzen und Schmiermittel diente.

Das Ergebnis war laut dem Historiker Antony Hopkins von der University of Texas eine Anpassungskrise: Während der Sklavenhandel auf Grund der erforderlichen wirtschaft-

Eine Karte der Königspaläste, von Siedlungen und unterirdischen Räumen ist die Frucht archäologischer Feldarbeit der letzten Jahre auf dem Abomey-Plateau in Dahomey. Die unterirdischen Kammern dienten vermutlich als Verstecke vor Sklavenjägern (Grafiken unten rechts). Durch neue Paläste im Hinterland von Abomey und Cana kontrollierten Dahomeys Herrscher die Landwirte. Das Foto zeigt die Ruine einer Anlage aus dem 19. Jahrhundert in Cana.



KARTE: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK; ZEICHNUNGEN: AMERICAN SCIENTIST; ALLES NACH KANDSBORG, K., MERKYTE, I. (HG): BENIN ARCHAEOLOGY, OXFORD 2019; FOTO: J. CAMERON MONROE

AUS: CHAUDOIN, E.: TROIS MOIS DE CAPTIVITÉ AU DAHOMEY, PARIS 1890

Mit dem Zusammenbruch des Sklavenhandels im 19. Jahrhundert wurde der Export landwirtschaftlicher Erzeugnisse wichtiger. Um Steuern auf die Profite zu erheben, ließen Dahomeys Könige Militärposten an Verkehrswegen und Marktplätzen errichten.

lichen und politischen Mittel hauptsächlich von einer Elite betrieben wurde, konnte nun jeder Palmenbesitzer am Handel teilnehmen. Auch die Eigner kleiner Plantagen sowie Zwischenhändler erwarben Reichtum – ein sozialer Prozess mit beträchtlichem Destabilisierungspotenzial.

Einige Dynastien Westafrikas trafen die richtigen Entscheidungen und überstanden diesen Wandel. Zu ihnen gehörte Dahomey. Der Herrscher schickte seine Soldaten weiterhin aus, Gefangene zu machen, aber diese wurden nun zur Feldarbeit eingesetzt. Immer mehr Sklaven lebten im Reich, die ländlichen Märkte gewannen an Bedeutung, die Gemeinwesen wurden wohlhabend. Die Regierung etablierte daraufhin ein Steuersystem, um von dieser Entwicklung zu profitieren. Beamte kontrollierten die wichtigsten Märkte und erhoben Abgaben. Ein Netzwerk von Außenposten kassierte Zölle von reisenden Händlern. Somit wird der Bau königlicher Paläste im Hinterland, abseits der Sklavenrouten, verständlich: Sie fungierten wohl als Knotenpunkte für diese neuen »Geldflüsse« in die Hauptstadt.

Auch nach drei Jahrzehnten intensiver Forschung im Süden Benins haben wir erst begonnen, die politischen und wirtschaftlichen Beziehungen zu rekonstruieren, die all die ländlichen Gemeinschaften mit den städtischen Zentren verbunden haben. Nach wie vor aber wissen wir wenig über das Alltagsleben in Allada, Hueda und Dahomey und fast nichts über die Zeit vor der Atlantischen Ära. Beides steht auf unserer Agenda für die kommenden Jahre. ~

DER AUTOR

James Cameron Monroe ist Archäologe an der University of California in Santa Cruz. Einen Schwerpunkt seiner Forschung bildet Westafrika zur Zeit des Sklavenhandels. Er leitet das Abomey Plateau Archaeological Project in der westafrikanischen Republik Benin, das Informationen aus schriftlicher und mündlicher Überlieferung sowie Archäologie zusammenführt. Der Beitrag ist eine aktualisierte Fassung seines Aufsatzes »Urbanism on West Africa's Slave Coast«, der 2011 in »American Scientist« erschien (Band 99, S. 400–409). Die Redaktion dankt dem Archäologen Detlef Gronenborn vom Römisch-Germanischen-Zentralmuseum in Mainz für seine Unterstützung.

QUELLEN

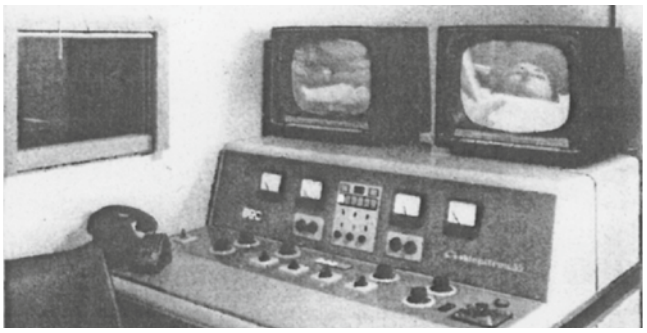
Kelly, K. G.: The Archaeology of African-European Interaction: Investigating the Social Roles of Trade, Traders, and the Use of Space in the Seventeenth- and Eighteenth-Century Hueda Kingdom, Republic of Bénin. In: World Archaeology 28, Routledge Publisher Abingdon, S. 351 – 369, 1997

Monroe, J. C., Ogundiran, A.: Power and Landscape in Atlantic West Africa: Archaeological Perspectives, Cambridge University Press, New York, 2012

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1155297**

© American Scientist
www.americanscientist.org



Das Bedienpult des Elektronenbeschleunigers mit den Kontrollbildschirmen.

Elektronenstrahlen gegen Krebsgeschwülste

»Im Röntgenhaus des Rudolf-Virchow-Krankenhauses in Berlin wurde ein 35-MeV-Betatron in Betrieb genommen. Es dient zur Tiefentherapie von Geschwulstkrankheiten. Das Betatron ist ein Elektronenbeschleuniger. Die Therapie mit Röntgen- oder Elektronenstrahlen beruht auf der Absorption dieser Strahlen im Gewebe des menschlichen Körpers. Der Arzt hat die Aufgabe, eine bestimmte Energiemenge in dem Gebiet der Geschwulst zur Wirkung zu bringen und dabei das übrige Gewebe zu schonen. Im Asklepitron 35, wie dieses Betatron genannt wird, ist ferner eine Röntgenanlage eingebaut. Sie ermöglicht das genaue Lokalisieren und das Einstellen des Bestrahlungsfeldes.« Elektronik 8, 1962, S. 231

Grabmalerei in Tikal

1962

»Während der letztjährigen Grabungskampagne in dem Tempelzentrum Tikal (Guatemala) wurde ein Grab aufgefunden, dessen Wände mit Hieroglyphen bemalt sind. Dies ist bisher einmalig in der Maya-Archäologie. Das sehr gut erhaltene Datum 9.1.1.10.10. würde mit dem 18. März 457 n. Chr. zu übersetzen sein. Die übrigen 25 Glyphen sind noch nicht entziffert. Eine weitere Besonderheit des Grabes liegt in der Gestalt der Hauptperson begründet. Diese hat augenscheinlich in der Mitte des Grabes gesessen und war nicht, wie sonst üblich, ausgestreckt auf den Boden gelegt worden. Außerdem fehlten der Person der Kopf und die Hände.« Die Umschau in Wissenschaft und Technik 16, 1962, S. 513

Das Datum »9.1.1.10.10« wurde in Hieroglyphenschrift auf die Grabwand gemalt (der Archäologe deutet auf die Zahl 10).

1912

Hören statt Sehen

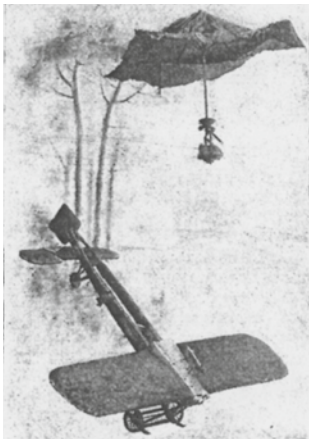
»Fournier d'Albe hat einen Apparat erfunden, mit welchem der Blinde das Licht hören kann und diesen Apparat nennt er ›Optophon‹. Das Instrument zerfällt in zwei Telephone und in die Selenbrücke, die Batterie, die Widerstände und einen Uhrwerkunterbrecher. Die Telephone befestigt der Blinde am Kopf. Eine Verminderung oder eine Vermehrung des Lichtes bewirkt eine Veränderung des Tones im Telephon und an der Stärke des Tones lässt sich auch die Helligkeit des Lichtes bestimmen.« Central-Zeitung für Optik und Mechanik 24, 1912, S. 274

Zähmung wilder Eichhörnchen

»Unser Eichhörnchen ist eines der scheuesten Waldtiere. Um so bemerkenswerter ist es, daß es im Eichwalde zu Wörishofen gelungen ist, die Eichhörnchen zutraulich zu machen. Ein österreichischer Offizier brachte die frühen Morgenstunden wegen Schlaflosigkeit im Walde zu. Zum Zeitvertreib legte er Haselnüsse auf die Baumstümpfe als Futter für die Eichhörnchen. Nach Verlauf von 6 Wochen wurden die Nüsse aus der Hand genommen.« Kosmos 8, 1912, S. 311

Schleudersitz für Bruchpiloten

»Die häufigen Abstürze von Aviatikern haben die Erfinder veranlaßt, nach Sicherheitseinrichtungen zu suchen, die wenigstens den Piloten zu retten vermögen. Interessant ist in dieser Beziehung eine Fallschirmvorrichtung. Gewöhnlich bildet der Schirm eine Art Paket, das hinter dem Sitz untergebracht ist. Durch die Stange steht es mit dem Sitz in Verbindung. Natürlich sind Schirm und Stange lösbar am Aeroplan befestigt, und der Sitz, der während des Unfalls den Aviatiker tragen soll, muss leicht getrennt werden können. Wird ein Hebel betätigt, so geben Riegel den Sitz frei. Beim Fallen des



Rettung an, doch nicht von der Stange.

Aeroplans hat die Luft den Schirm aus seinem Lager gehoben, um ihn zu entfalten, und nun trägt die aufgerichtete Stange den Sitz des Luftschiffers, der auf diese Weise gerettet wird.« Technische Monatshefte 8, 1912, S. 250–251

AUS ZEITSCHRIFTEN DER FORSCHUNGSBIBLIOTHEK FÜR WISSENSCHAFT- UND TECHNIKGESCHICHTE DES DEUTSCHEN MUSEUMS

GEOMETRIE

Magische Sechsecke

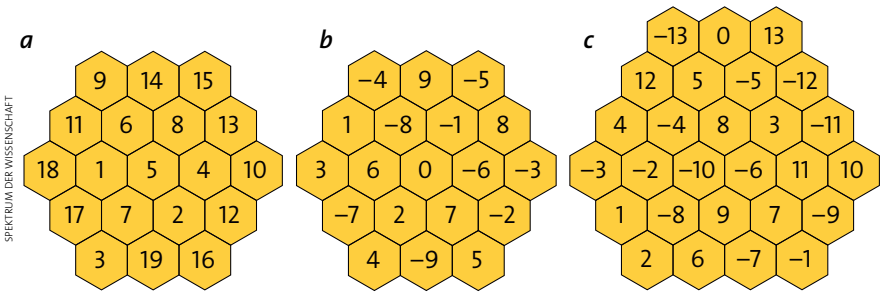
Je nachdem, ob sie ihrerseits aus Sechsecken oder Dreiecken bestehen, ist ihre Konstruktion schwierig bis unmöglich – oder so einfach, dass man ein Spiel daraus machen kann.

VON CHRISTOPH PÖPPE

Magische Quadrate gibt es im Überfluss. Die Aufgabe lautet: Man fülle die Zahlen von 1 bis n^2 in ein quadratisches Schema von $n \cdot n$ Feldern ein, so dass die Summe über jede Zeile, jede Spalte und über beide Diagonalen stets dieselbe ist. Es gibt zahlreiche Anleitungen zu ihrer systematischen Lösung und noch viel mehr Lösungen, die einfach durch Probieren zu Stande kommen – je größer die Quadratseite n, desto mehr.

Nun ist das Quadrat nicht die einzige Form, mit der man die Ebene lückenlos bepflastern kann. Da regelmäßige Sechsecke, im bekannten Bienenwabenmuster angeordnet, ein hübsches Bild abgeben, haben viele Leute nach einem »magischen Sechseck« gesucht, also einer Anordnung aus – zum Beispiel – 19 Sechsecken in Reihen der Längen 3, 4, 5, 4, 3, die derart mit den Zahlen von 1 bis 19 belegt werden, dass alle »Reihensummen« gleich sind (Bild unten, *a*). Dabei verläuft eine »Reihe« entweder waagerecht, schräg ansteigend oder schräg abfallend. Aus einer solchen Anordnung von Bienenwaben (einem »Sechseckssechseck«) kann man eine größere machen, indem man sie allseits mit einem Ring von Sechsecken umgibt. Das Verfahren ist beliebig wiederholbar; die so konstruierten Sechseckssechsecke haben sämtlich ungerade Seitenlängen.

Dass im Fall der Seitenlänge 3 die magische Summe 38 betragen muss, lässt sich leicht ausrechnen. Eine magische Belegung mit Zahlen zu finden, ist jedoch alles andere als einfach. Als der legendäre Martin Gardner 1963 in den »Mathematical Games« im »Scientific American« über das Thema schrieb, wusste er eine geradezu tragische Geschichte zu erzählen. Ein Eisenbahnangestellter namens Clifford W. Adams war 1910 in einer Zeitung auf das (fehlerhaft gestellte) Problem gestoßen und hatte immer wieder daran gearbeitet – zunächst erfolglos. 47 Jahre später, während er sich von einer Operation erholte, machte er sich erneut daran, fand eine Lösung – und verlegte den Zettel, auf dem er sie notiert hatte. Es kostete ihn weitere fünf Jahre, die schon gefundene Lösung zu rekonstruieren.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

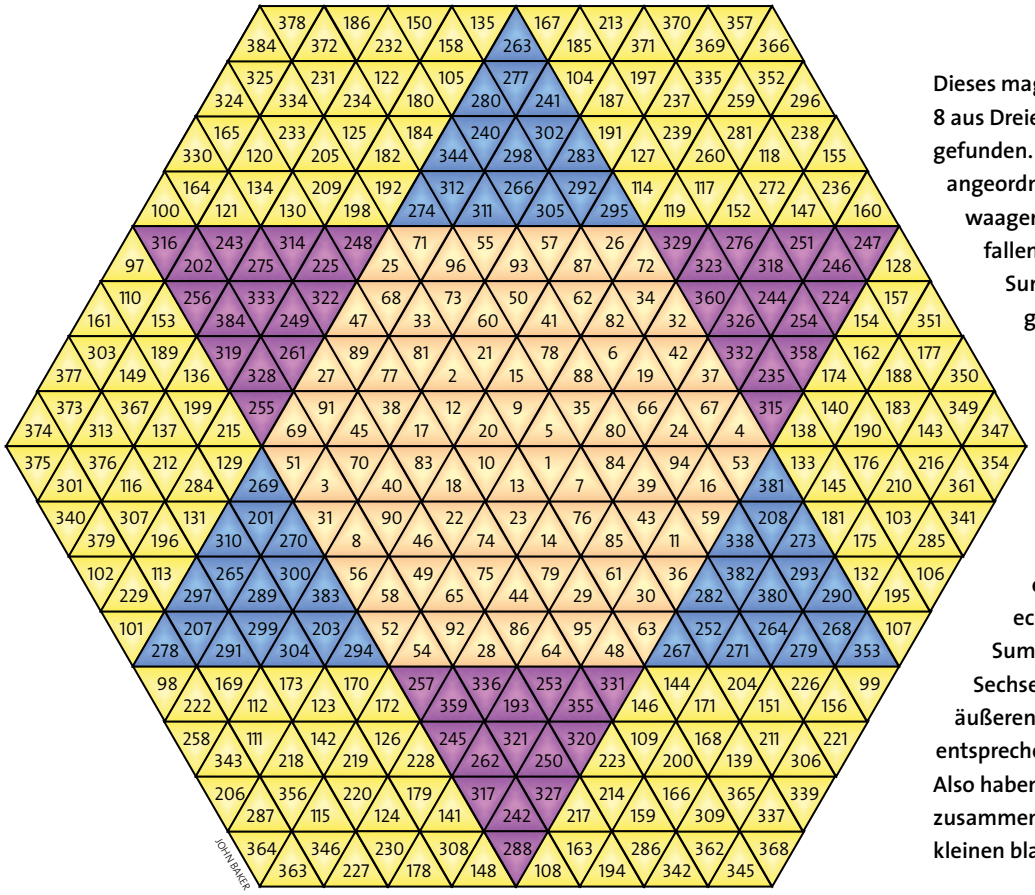
Es gibt bis auf Drehungen und Spiegelungen nur ein einziges magisches Sechseck aus kleineren Sechsecken im strengen Sinn *(a)*. Für die Belegung desselben Schemas mit den Zahlen von –9 bis 9 existieren dagegen mehrere Lösungen, darunter die von Ivan Paasche (1986), die bemerkenswerte Symmetrien aufweist *(b)*. Bild *c* zeigt ein magisches Sechseck mit sechs Zeilen und Belegung von –13 bis 13.

Diesmal sandte Adams den Zettel an Gardner. Der war zunächst wenig beeindruckt, schickte die Lösung an einen Fachmann namens Charles W. Trigg und erfuhr dann zu seiner Überraschung, dass diese Lösung – bis auf Drehungen und Spiegelungen – nicht nur die einzige für das beschriebene Sechseck der Seitenlänge 3 ist, sondern die einzige überhaupt. Für alle anderen Seitenlängen gibt es nämlich keine Lösungen, abgesehen von der trivialen für die Seitenlänge 1: eine Eins in einem einsamen Sechseck.

Die magischen Sechsecke von Stralsund

Hoffen wir, dass dem armen Adams die Erkenntnis erspart geblieben ist, dass seine jahrzehntelange Arbeit umsonst war. Nicht nur war inzwischen im Dezember 1958 in der »Mathematical Gazette« ein magisches Sechseck erschienen, das im Wesentlichen ein Spiegelbild von Adams' Lösung war. Schlimmer noch: Die Lösung war schon vor seiner Geburt bekannt. Ernst von Haselberg (1827–1905) hatte 1888 in der »Zeitschrift für den mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterricht« den Lesern die Aufgabe gestellt und musste die Lösung ein Jahr später mangels Einsendungen selbst nachtragen. Im Hauptberuf war er Stadtbaumeister von Stralsund. Dass heute noch das Rathaus seiner Heimatstadt die bekannte Schaufassade im Stil der Backsteingotik trägt, ist seinen Sanierungsbemühungen zu verdanken.

Warum ist von Haselbergs Lösung die einzig mögliche? Warum widersetzt sich das Sechseckmuster so hartnäckig der magischen Belegung, während das



Dieses magische Sechseck der Seitenlänge 8 aus Dreiecken hat John Baker 2004 gefunden. Die Zahlen von 1 bis 384 sind so angeordnet, dass die Summe über jede waagerechte, ansteigende oder abfallende Reihe gleich der magischen Summe *m* = 4620 ist. Kleine und große Zahlen sind säuberlich nach innen und außen getrennt: Das innere (orange) Sechseck mit Seitenlänge 4 enthält genau die Zahlen von 1 bis 96. Das »violette Dreieck«, bestehend aus den kleinen violetten Dreiecken und dem zentralen Sechseck, enthält viermal die magische Summe *m* (16 *m* für das ganze Sechseck minus dreimal 4 *m* für die äußeren Streifen); dasselbe gilt für das entsprechend definierte »blaue« Dreieck. Also haben die kleinen violetten Dreiecke zusammen dieselbe Summe wie die kleinen blauen, nämlich 13 824.

Quadratmuster in dieser Beziehung sehr entgegenkommend ist? Zwei Gründe springen ins Auge. Erstens ist im Sechseck jedes Feld an drei Gleichungen (Bedingungen für die Summe) beteiligt; das gilt im Quadrat nur für die Felder, die auf einer der beiden Diagonalen liegen, während sich ein »gewöhnliches« Feld nur in zwei Summen einfügen muss.

Zweitens und entscheidender: Die Reihen, die an die Stelle der Zeilen und Spalten im magischen Quadrat treten, sind unterschiedlich lang! Während die mittlere Zeile fünf Plätze zur Verfügung hat, um die magische Summe von 38 zu erreichen, müssen die oberste und die unterste das mit jeweils nur drei Plätzen schaffen. Kein Wunder, dass tendenziell die großen Zahlen am Rand liegen – mit der merkwürdigen Ausnahme 3 in der linken unteren Ecke – und die kleinen in der Mitte. Das schränkt die Freiheit, die Zahlen auf die Felder zu verteilen, erheblich ein – so sehr, dass nur dieses eine Sechseck übrig bleibt.

An dieser Stelle kommt Hans-Friedrich Bauch, Mathematikprofessor an der Fachhochschule Stralsund, ins Spiel. Ein ganzes Jahrhundert nach von Haselberg, 1989, entdeckte er im Stralsunder Stadtarchiv dessen Originalaufzeichnung und begann daraufhin eigene Untersuchungen, an denen auch seine Studenten beteiligt waren.

Wie häufig in der Mathematik, war eine geschickte Bezeichnungsweise der Schlüssel zu neuen Erkenntnissen. Bauch sortierte die magischen Figuren – quadratische wie sechseckige – nicht nach der Seitenlänge, sondern nach der Zeilenzahl. Für die Quadrate macht das keinen Unterschied; bei den Sechsecken öffnet es einem die Augen dafür, dass es neben den Anordnungen mit ungerader Seitenlänge auch solche mit gerader Zeilenzahl gibt; das Bild links unten zeigt neben zwei Fünfzeilern einen Sechszeiler *(c)*.

Diese neuen Sechseckmuster sind weniger symmetrisch als die bisherigen; so wechseln sich beim Sechszeiler die Seitenlängen 3 und 4 ab. Das Zentrum der – etwas geringeren – Drehsymmetrie liegt nun nicht mehr im Mittelpunkt eines Sechsecks, sondern auf einer Ecke des Musters.

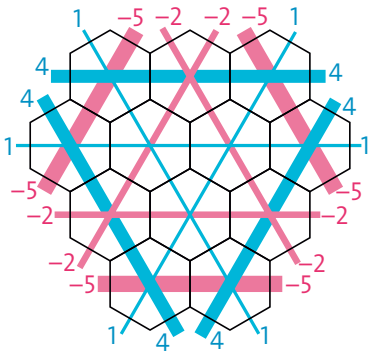
Die erste Erkenntnis ist enttäuschend: Sechseckssechsecke mit gerader Zeilenzahl können überhaupt nicht magisch sein. Ein einfaches Argument (Kasten S. 70) zeigt, dass ein Vierzeiler die magische Summe null haben müsste; und die Beweisführung lässt sich auf jede gerade Zeilenzahl erweitern.

An dieser Stelle macht Bauch aus der Not eine Tugend. Wenn die magische Summe null sein muss, dann suchen wir eben nach magischen Sechsecken mit Summe null! Dazu lässt man die Einträge nicht mehr – im Beispiel des Sechsecks mit Seitenlänge 3 – von 1 bis 19 laufen, sondern von –9 bis 9. Und für jemanden, der keine Angst vor negativen Zahlen hat, ist es nicht weniger natürlich, eine Folge ganzer Zahlen ausgewogen um die Null herum anzuordnen, als sie von 1 an loslaufen zu lassen.

Das vierzeilige Sechseckssechseck hat keine magische Belegung

Beweis: Nehmen wir an, es gäbe eine solche Belegung mit der magischen Summe m. Dann addieren wir zunächst alle langen Viererreihen (dünne blaue Linien). Dabei werden die drei zentralen Felder doppelt gezählt. Zur Kompensation addieren wir −2-mal die inneren Dreierreihen (dünne rote Linien). Dadurch gehen drei Felder am äußeren Rand mit dem Faktor −4 in die Summe ein. Zum Ausgleich addieren wir 4-mal die äußeren Dreierreihen (dicke blaue Linien) und schließlich −5-mal die äußeren Zweierreihen (dicke rote Linien).

Nach Konstruktion summieren sich die Beiträge in jedem Feld zu null. Also muss die Gesamtsumme gleich null sein. Andererseits müsste dieselbe Summe $3m - 2 \cdot 3m + 4 \cdot 3m - 5 \cdot 3m = -6m$ betragen, denn die Summe über jede Reihe ist nach Annahme gleich der magischen Summe m. Daraus folgt $6m = 0$.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Die Freiheit, die man sich auf diese Weise herausnimmt, trägt alsbald reiche Früchte. Es wird nämlich deutlich einfacher, die magischen Bedingungen zu erfüllen. Die kurzen Reihen müssen sich nicht mehr anstrengen, um auf die magische Summe zu kommen, und die langen laufen nicht mehr Gefahr, zu groß zu werden. Es genügt, wenn jede von ihnen durchschnittlich ist; nichts anderes bedeutet eine Summe von 0.

Und siehe da: In dieser Form hat das Problem nicht nur genau eine, sondern mehrere Lösungen. Das Bild S. 68 *b* zeigt eine davon. Für den Sechszeiler fanden die Studenten Christian Schäfer und Ronny Zapf 2006 eine magische Belegung mit Summe 0 (Bild S. 68, *c*).

Auch die Beschränkung auf die Seitenlängen 1 und 3 entfällt. Wahrscheinlich gibt es unter den gelockerten Bedingungen magische Sechsecke jeder Größe. Der derzeitige Rekordhalter hat die Seitenlänge 8, Einträge von −84 bis 84 (Bild S. 71 oben) und – bei der symmetrischen Belegung unvermeidlich – die magische Summe 0.

Wie bei den magischen Quadraten kann man davon ausgehen, dass mit zunehmender Größe die Zahl der möglichen Anordnungen schneller anwächst als die Zahl der Bedingungen. Damit steigt auch die Anzahl der Lösungen – und der Rechenaufwand fürs Durchprobieren.

Sechseckssechsecke und Dreieckssechsecke

Alles in allem bleiben magische Sechsecke aus Sechsecken schwer aufzuspüren und in jedem Sinn ungesellige Einzelgänger, selbst wenn man sich die Freiheit nimmt, die Folge der Einträge mit irgendeiner Zahl anfangen zu lassen. Flexibilität und eine gewisse Reichhaltigkeit kommen erst auf, wenn man die einzelnen Bausteine eines Bienenwabenmusters »zersägt«, indem man vom Mittelpunkt zu jeder der Ecken schneidet. Das ergibt die dritte und letzte aller überhaupt möglichen Pflasterungen der Ebene mit regulären Vielecken: die mit gleichseitigen Dreiecken.

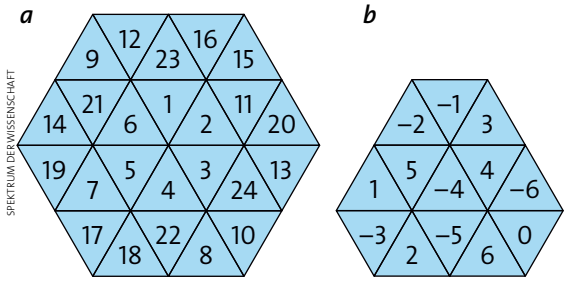
Diese fügen sich bereitwillig zu einem Sechseck, das im Gegensatz zu den Bienenwabenmustern sogar einen glatten statt gezackten Rand hat. Allerdings ergeben sich hier nun die symmetrischsten Figuren, wenn nicht ein Dreiecksmittelpunkt, sondern eine Ecke den geometrischen Mittelpunkt des Musters bildet.

Wieder stellt sich die Frage, ob man diese Dreiecke so mit Zahlen belegen kann, dass alle geraden wie schrägen Reihen dieselbe Summe ergeben. Eine Reihe enthält lauter Dreiecke, die mit der Spitze abwechselnd nach oben und nach unten zeigen.

Diesmal lautet die Antwort »Ja«. Hans-Friedrich Bauch selbst hat 1991 eine magische Belegung im strengen Sinn für das vierzeilige Dreieckssechseck gefunden (Bild unten, *a*) – und es gibt noch mehr. Damit es eng wird mit den Lösungen, muss man schon zum kleinsten Exemplar der weniger symmetrischen Variante übergehen (Bild unten, *b*). Für dieses Muster gibt es nur zehn wesentlich verschiedene Lösungen mit der Summe 0.

Wieder wächst die Zahl der Möglichkeiten rasch mit der Seitenlänge an. John Baker, freischaffender Mathematikpädagoge in Australien, hat viele magische Dreieckssechsecke gesucht und gefunden, bis zu dem monumentalen Muster der Seitenlänge 8 und 384 Einträgen (Bild S. 69).

Die Anzahl der Dreieckssechsecke zu dieser Seitenlänge muss gigantisch sein, schon weil es häufig gelingt, die kleinsten Zahlen in dem zentralen Sechseck mit der halben Seitenlänge so unterzubringen, dass dieses selbst magisch ist. Dann kann man ein magisches Zentralsechseck gegen ein ande-



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Ein magisches Dreiecks-sechseck der Seitenlänge 2, gefunden von Hans-Friedrich Bauch 1991 *(a)*; magisches Dreieckssechseck minimaler Größe mit Dreieck im Zentrum *(b)*, berechnet 2007 von Matias Palomäki.

res austauschen, ohne dass sich im Außenbereich etwas ändern müsste. Also gibt es mindestens so viel große magische Sechsecke, wie es kleine gibt, mal der Zahl der Möglichkeiten, die größeren Zahlen im Außenbereich anzuordnen. Und das ist nur eine untere Abschätzung. Wenn man bedenkt, dass es zur Seitenlänge 2 bereits 59 674 527 wesentlich verschiedene magische Belegungen gibt …

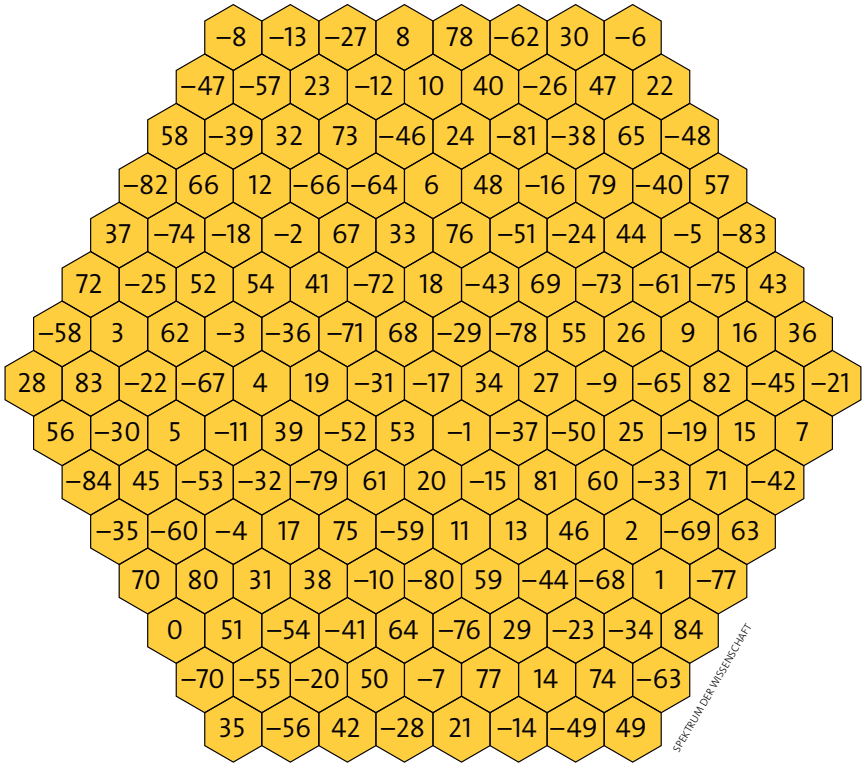
Wie in den Sechseckssechsecken gibt es Reihen, die nicht parallel sind und trotzdem kein Feld gemeinsam haben. Mehr noch: Zwei Reihen, die sich überhaupt treffen, haben im Allgemeinen gleich zwei gemeinsame Felder, was die Erfüllung der Summengleichungen eher erleichtert als erschwert.

Wenn das Schema, wie häufig, eine gerade Anzahl von Feldern hat, kann man die magische Summe 0 nicht durch Beginn der Zahlenfolge beim richtigen negativen Wert erzwingen. Bei 24 Einträgen ist der Bereich von –11 bis 12 zu groß und der von –12 bis 11 zu klein. Die Lösung des Problem besteht darin, dass man die Null weglässt. Die Aufgabe lautet nun also, die Zahlen von 1 bis 12 und von –1 bis –12 so zu verteilen, dass in jeder Reihe die magische Summe 0 herauskommt.

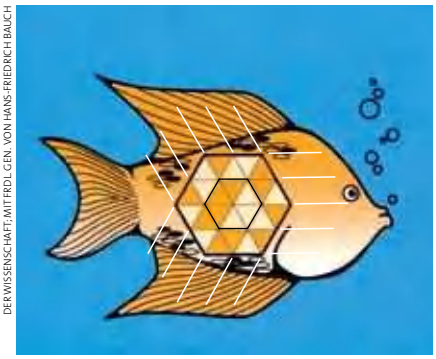
Unter dieser Bedingung gibt es nun eine derartig große Anzahl an Lösungen, dass man sie zu einem Einpersonenspiel umfunktionieren kann. Bauchs Kollege Klaus-Peter Rudolph hat es erfunden und »Gurami« genannt (Bild unten). Man spielt es mit Papier und Bleistift (oder äquivalenten Mitteln am Computer). Der Aufgabensteller gibt alle Vorzeichen vor: Positive Felder sind hell, negative dunkel. Wie beim Sudoku sind einige Felder bereits ausgefüllt. Die restlichen muss der Spieler so aus dem noch verfügbaren Zahlenvorrat belegen, dass in jeder Reihe die Summe der hellen Felder gleich derjenigen der dunklen Felder ist.

Der Name »Gurami« spielt auf den gleichnamigen, in Ostasien verbreiteten Speisefisch an, der auch bei Aquariumsbesitzern wegen seines charakteristischen Kussmundes beliebt ist. Auf ihn kommt es beim Spiel jedoch nicht an, sonden vielmehr auf die Flossen. Geeignet stilisiert, sind sie in Richtung der Reihen angeordnet, die es mit den richtigen Zahlen zu füllen gilt. Auf ihnen kann man Zwischenergebnisse notieren.

Auch hier kommt es darauf an, durch geschicktes Kombinieren die Zahl der zu probierenden Möglichkeiten niedrig zu halten. Anders als beim Sudoku muss man jedoch ein bisschen rechnen. ~



Dieses magische Sechseck der Seitenlänge 8 hat Louis K. Hoelbling am 5. Februar 2006 in die englische Wikipedia (Stichwort »magic hexagon«) eingestellt.



KLAUS-PETER RUDOLPH; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT; MIT FREUNDLICHER VON HANS-FRIEDRICH BAUCH

Der Gurami-Zahlenfisch mit leicht abgewandelten Flossen (weiße Striche) zum Notieren von Zwischenergebnissen.

DER AUTOR

Christoph Pöppe ist promovierter Mathematiker und Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

QUELLEN

Bauch, H.-F.: Magische Figuren in Parketten. In: Mathematische Semesterberichte 38, S. 99–115, 1991

Gardner, M.: Mathematical Games. Permutations and Paradoxes in Combinatorial Mathematics. In: Scientific American 8/1963, S. 112–119

Rudolph, K.-P., Bauch, H.-F.: Gurami – das neue Zahlenrätsel. Mit 60 Aufgaben für kreative Tüftler. Bambus Spieleverlag, Berlin 2011

WEBLINKS

www.gurami-raetsel.de
Beschreibung des Rätseltyps, Beispielaufgaben und Lösungshinweise

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1155298

Wie riskant ist das **Fracking**?

Für höhere Förderleistungen und zur Erschließung unkonventioneller Quellen von Erdgas werden Gesteinsformationen rund um das Bohrloch durch Einpressen einer Flüssigkeit aufgebrochen. Gefährdet dieses »Fracking« das Grundwasser?

Von Chris Mooney

Umweltschützer warnen vor einer neuen Gefahr für das Trinkwasser. Sie drohe von der massiven Ausweitung einer umstrittenen Bohrmethode zur Gewinnung von Erdgas. Dieses »hydraulic fracturing« (hydraulisches Aufbrechen) oder kurz Fracking kam schon im letzten Jahrhundert ab den späten 40er Jahren vereinzelt zur Anwendung: Wenn eine konventionelle, vertikale Bohrung auf eine Schiefergesteinsschicht traf, wurden mit Chemikalien versetztes Wasser und Sand unter hohem Druck in die Erde gepresst, um das Gestein aufzubrechen und das enthaltene Erdgas freizusetzen. Heutzutage kombinieren Mineralölkonzerne diese Methode jedoch mit der neuen Horizontalbohrtechnik. Dabei wird eine zunächst abwärtsgerichtete Bohrung nach einer 90-Grad-Drehung innerhalb der Gesteinsschicht parallel zur Erdoberfläche um mehrere hundert Meter fortgesetzt.

Diese Neuerung hatte einen regelrechten Gasrausch zur Folge. Abgeschlossene, methanreiche Schiefergesteinsschichten ließen sich plötzlich gezielt ausbeuten. In den USA gibt es schätzungsweise 23 Billionen Kubikmeter an erschließbaren Vorkommen dieses »unkonventionellen« Schiefergases; weltweit dürften es über 900 Billionen und in Deutschland nach den jüngsten Zahlen der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe zwischen 0,7 und 2,3 Billionen Kubikmeter sein. Allerdings könnte die Gewinnung schwieriger und teurer werden als von den Bohrfirmen behauptet. Darauf lassen jedenfalls E-Mails aus Industriekreisen schließen, welche die »New York Times« im Juni 2011 veröffentlichte.

Als wesentliche Hürde erweist sich, dass zum Fracking bei Horizontalbohrungen sehr viel größere Mengen an Wasser und Chemikalien erforderlich sind als bei vertikalen Bohrlöchern. Deshalb braucht man riesige Becken oder Tanks zur Speicherung des mit Chemikalien belasteten »Flowback«, wie das zurückgepumpte Wasser nach dem Aufbrechen der Bohrlöcher genannt wird.

Um sich ein Bild von den Gefahren des Frackings zu machen, veranstaltete die Environmental Protection Agency (EPA), die oberste Umweltschutzbehörde der Vereinigten Staaten, im März 2011 eine Tagung in Arlington (Virginia). Eingeladen waren unter anderem Wissenschaftler der führenden Erdgas- und Bohrfirmen wie Devon Energy, Chesapeake und Halliburton. Sie sollten zu der Frage Stellung nehmen, ob Fracking – wie vielfach vermutet – in verschiedenen US-Bundesstaaten für das Eindringen von Giftstoffen und Erdgas in Trinkwasservorkommen verantwortlich ist. Die Antwort hat große Bedeutung in einem sich zuspitzenden Konflikt, der in den US-Bundesstaaten New York, Pennsylvania, Texas und Colorado sowie in Ländern wie Australien,

AUF EINEN BLICK

UMSTRITTENE BOHRMETHODE

1 Die neuartige Technik der **Horizontalbohrung** macht auch unkonventionelle Erdgasquellen wie **Schieferformationen** zugänglich. Allerdings muss die gashaltige Gesteinsschicht dazu entlang der Bohrung in regelmäßigen Abständen aufgebrochen werden. Das geschieht durch Einpressen großer Mengen mit Chemikalien versetzten Wassers.

2 Bei diesem so genannten **Fracking** entstehen Risse im Gestein. Durch sie könnten, wie Umweltschützer befürchten, Gase und die zum Aufbrechen benutzte Flüssigkeit in höher gelegene Schichten aufsteigen und dort das **Grundwasser** verunreinigen.

3 Tatsächlich gibt es in den USA dokumentierte Fälle, in denen Brunnen in der Nähe von Erdgasbohrungen **giftige Chemikalien** enthielten und sogar Leitungswasser entflammbar war.

4 Genaue Untersuchungen ergaben jedoch, dass nicht das Fracking selbst die Verseuchungen verursacht hatte, sondern unsachgemäßes **Einzementieren** des Förderrohrs oder fehlerhafter Umgang mit dem **»Flowback«**, dem nach dem Aufbrechen zurückgepumpten Wasser.

5 Fracking ist wegen der **enormen Wassermengen** jedoch besonders anfällig für solche Probleme. Außerdem lässt sich erst mit weiteren Untersuchungen definitiv klären, ob wirklich keine Verbindung zwischen dem Bohrloch und höher gelegenen Grundwasserleitern entstehen kann.

So läuft das Fracking ab: Nachdem eine Bohrung in eine mehr als 1500 Meter tief liegende Schieferformation abgeteuft und dann in horizontaler Richtung weitere 1500 Meter fortgesetzt worden ist, wird der Bohrmeißel herausgezogen (untere Diagramme, links) und ein Gemisch aus Wasser, Sand und Chemikalien durch den Schacht in den Untergrund gepresst (Mitte). Dadurch bricht das Schiefergestein, und aus den entstehenden Rissen kann das eingeschlossene Gas entweichen (rechts). Es drückt die Flüssigkeit zurück zur Oberfläche. Das Abwasser wird in Becken oder Tanks gespeichert.

Frankreich, Kanada und nicht zuletzt Deutschland ausgetragen wird (siehe Kasten auf S. 76/77).

Als unabhängiger Experte nahm auch Anthony Ingraffea, Professor für Ingenieurwissenschaften von der Cornell University in Ithaca (New York), an der Tagung teil. Dort erlebte er, wie die Industrieforscher den Verdacht weit von sich wiesen, Fracking könne bestätigte Fälle von Kontaminationen verursacht haben, bei denen Brunnen giftige Chemikalien enthielten und aus Wasserhähnen ein brennbares Wasser-Gas-Gemisch kam. Schließlich, so die Argumentation, läge die Schieferschicht ein bis zwei Kilometer tief in der Erde, von flacheren Grundwasserleitern durch dicke Gesteinsformationen getrennt. Ebendeshalb sei es bisher ja so schwierig gewesen, das Schiefergas überhaupt zu erschließen. Auch wenn bei Fracking starke Kräfte ausgeübt würden, reichten diese keineswegs aus, um Risse zu erzeugen, die von der Bohrung bis zum oberflächennahen Grundwasser reichten.

»Ich sah imposante PowerPoint-Präsentationen, die zeigten, wie die Firmen sich das Geschehen im Untergrund vorstellen«, sagt Ingraffea. Früher arbeitete er für das weltweit operierende Erdgasversorgungsunternehmen Schlumberger, wurde dann aber zu einem der führenden Kritiker des Gasrauschs. »Der Referent kam jeweils zu dem Schluss, eine Verunreinigung des Grundwassers sei höchst unwahrscheinlich.« Doch diese Analysen, erklärt der Cornell-Wissenschaftler, berücksichtigten nur einzelne Fracks, also einen einmaligen Wasserstoß in eine seitliche Schiefergesteinsschicht. Um Zugang zu möglichst viel Erdgas zu bekommen, würden die Firmen pro Standort jedoch ein Dutzend oder mehr Löcher in geringen Abständen bohren. Das könne das umgebende Gestein in zahlreiche Segmente aufbrechen und einmal entstandene Risse nach und nach vertiefen.

Schuldig per Definition?

Die Beschäftigung mit dem Thema kommt reichlich spät. Zumindest gilt das für die USA, wo Fracking bereits in großem Stil zum Einsatz kommt. Eine von der EPA in Auftrag gegebene, umfangreiche Sicherheitsstudie wird frühestens Ende dieses Jahres erwartet – und das auch nur in einer vorläufigen Fassung. Bis dahin ist eine abschließende Bewertung kaum möglich.

Grund zur Sorge gibt es durchaus. Ehrfurcht gebietend sind allein schon die 7,5 bis 15 Millionen Liter Wasser, versetzt mit rund 20 000 bis 100 000 Litern an Chemikalien, die für jede einzelne horizontale Bohrung benötigt werden. Diese Menge ist mit der Anzahl der Seitenschächte zu multiplizieren, die von der Sohle jeder vertikalen Bohrung vorgetrieben werden. Der Transport und die Aufbewahrung der Flüssigkeiten erfordern Flotten von Tanklastwagen sowie riesige Speicherbehälter.

Noch problematischer ist, den Flowback nach dem Fracking zu bewältigen. Bis zu 75 Prozent des Wassers, das in die Erde gepresst wird, kehrt zur Oberfläche zurück. Es ist nicht nur mit einem Chemikaliencocktail belastet – Zusätzen, die das Fließen der Fracking-Flüssigkeit erleichtern, das Bohrrohr schützen und Bakterien abtöten –, sondern enthält oft auch radioaktives Material und Salze aus dem Untergrundgestein. Diese Giftbrühe muss vor Ort zwischengespeichert und schließlich zu Abwasserreinigungsanlagen transportiert werden. Die meisten Firmen nutzen offene Becken im Erdreich. Viele US-Bundesstaaten verlangen, zumindest die Böden dieser Gruben mit Kunststofffolien auszukleiden, um Leckagen vorzubeugen. Andere fordern zusätzlich einen ausreichenden Abstand der Becken von Oberflächengewässern. Doch diese Vorsichtsmaßnahmen können nicht verhindern, dass etwa Beckenverkleidungen reißen oder die Behälter bei Starkregen überlaufen. Im Bundesstaat New York ist deshalb geplant, nur Wassertanks zur Speicherung des Flowbacks zuzulassen und Vorkehrungen für den Fall des Überlaufens zu verlangen.

Trotzdem kann es immer zu Unfällen kommen. »Dies ist kein risikoloses Geschäft«, erklärt Terry Engelder, Experte für Fracking an der Pennsylvania State University in University Park. Im Grunde ein Befürworter des Verfahrens, hat er damit operierende Firmen dennoch gelegentlich kritisiert. Einige in der »New York Times« veröffentlichte Enthüllungsgeschichten belegen die Kontamination der Haupteinzugsgebiete von Flüssen in Pennsylvania, etwa des Susquehanna und des Delaware. Ursache war hier der unsachgemäße Umgang mit Flowback. In Pennsylvania floss aus Leitungen in Haushalten verseuchtes Wasser, das manchmal sogar entflammbar war. Bohrfirmen wurden vorgeladen und mit Bußgeldern belegt. Jüngst verhängte das Umweltministerium von Pennsylvania mehr als eine Million Dollar Strafe gegen die Firma Chesapeake, weil sie durch unsachgemäßes Bohren die Brunnen von 16 Haushalten mit Methan verunreinigt hatte.

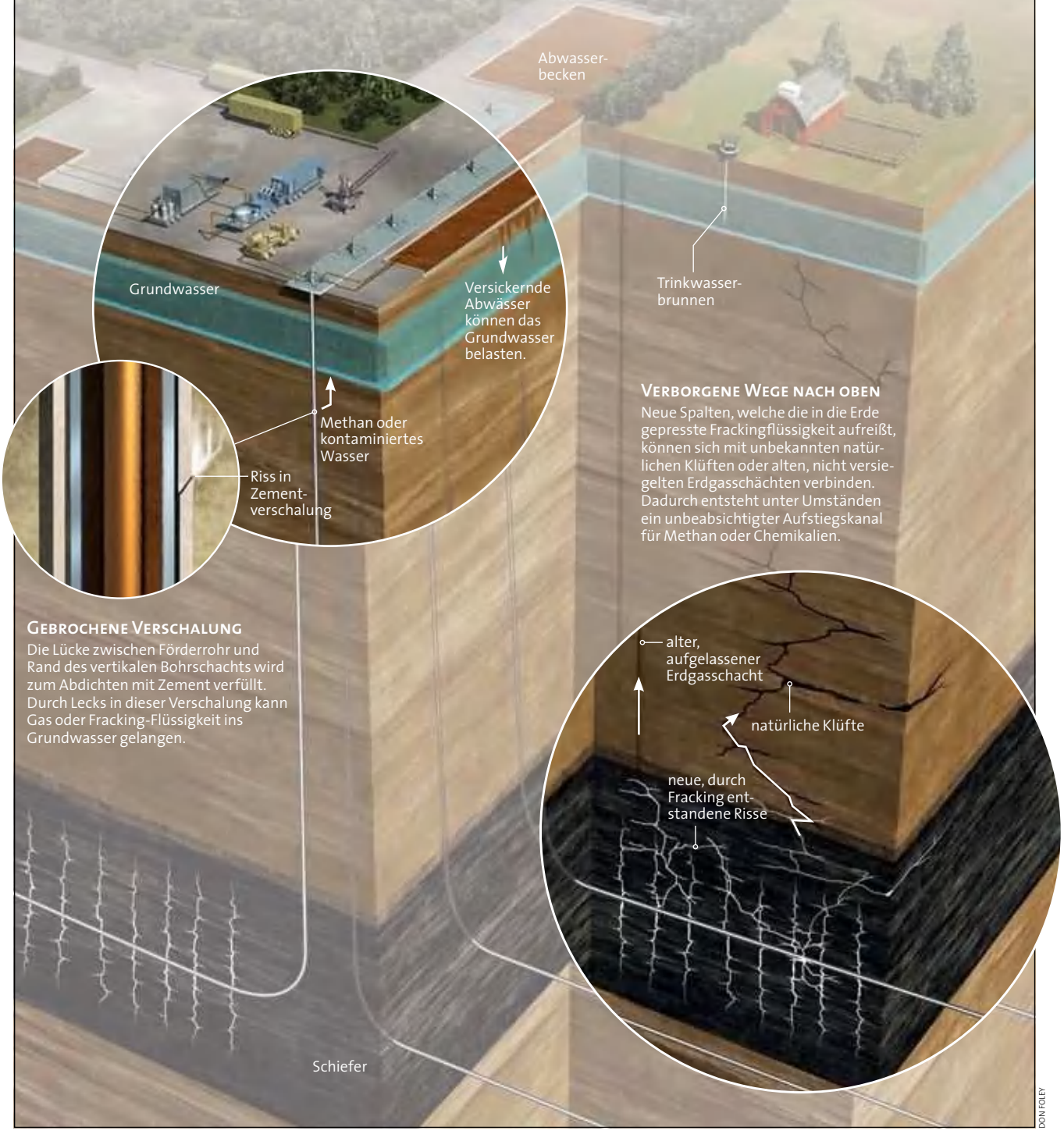
Solche Vorkommnisse lassen sich dem Fracking anlasten, sofern sich die Bezeichnung auf den gesamten Fördervorgang bezieht, nicht jedoch, wenn nur das Aufbrechen des Umgebungsgesteins im Untergrund gemeint ist. Selbst Experten sind da unterschiedlicher Ansicht. »Die Verwendung von Chemikalien in dieser Größenordnung stellt grundsätzlich eine Gefahr dar, aber mehr im allgemein industriellen Sinn, nicht, was das Fracking selbst betrifft«, argumentiert Val Washington, ehemals stellvertretende Kommissarin im Umweltministerium des Bundesstaats New York. Doch Ingraffea sieht das anders. »Die Industrie sollte aufhören, auf dem Argument ›Nicht das Fracking verursacht die Verunreinigung‹ herumzureiten. All die Begleitumstände sind ein notwendiger Bestandteil des Verfahrens. Die Bohrfirmen betreiben Wortklauberei und verstecken sich hinter Definitionsfragen.«

Allerdings haben die Firmen insofern Recht, als es die Risiken durch das Aufbrechen des Gesteins selbst sind, welche die Öffentlichkeit am meisten beunruhigen. Es geht dabei um Befürchtungen, dass das Fracking vielleicht unvorhergesehene Durchlässe für Gase oder Flüssigkeiten schafft, so dass sie von den tief liegenden Schiefervorkommen bis in das oberflächennahe Grundwasser aufsteigen können.

Wie komplex dieses Thema ist, zeigt eine Zwangsmaßnahme der EPA im Jahr 2010 gegen Range Resources, eine Erdgas-

Potenzielle Gefahren für das Trinkwasser

Um möglichst viel von dem Gas einer Schieferformation zu fördern, werden rund um ein Auffangbecken für das Abwasser auf engem Raum ein Dutzend und mehr Horizontalbohrungen niedergebracht und gefrackt. Auf drei Arten kann es dabei zur Verunreinigung von Grundwasser kommen. Erstens besteht die Gefahr, dass das Auffangbecken für die chemikalienbelasteten Abwässer undicht wird oder überfließt (obere Detailgrafik). Letzteres ist im September 2011 in Pennsylvania infolge einer Überflutung durch den Tropensturm Lee passiert. Zweitens kann relativ weit oben im vertikalen Bohrschacht ein Leck in der Zementverschalung auftreten (Ausschnittvergrößerung links). Drittens besteht die Möglichkeit, dass sich durch das Fracking entstandene Risse mit natürlichen Spalten im Gestein oder alten Bohrschächten verbinden (untere Detailgrafik).



Gebrochene Verschalung

Die Lücke zwischen Förderrohr und Rand des vertikalen Bohrschachts wird zum Abdichten mit Zement verfüllt. Durch Lecks in dieser Verschalung kann Gas oder Fracking-Flüssigkeit ins Grundwasser gelangen.

Verborgene Wege nach oben

Neue Spalten, welche die in die Erde gepresste Frackingflüssigkeit aufreißt, können sich mit unbekannten natürlichen Klüften oder alten, nicht versiegelten Erdgasschächten verbinden. Dadurch entsteht unter Umständen ein unbeabsichtigter Aufstiegskanal für Methan oder Chemikalien.

DON FOLEY

gesellschaft aus Fort Worth, die Lagerstätten im berühmten Barnett-Schiefer in Texas exploriert. Die Umweltbehörde fand in zwei Trinkwasserbrunnen von Häusern in der Nähe zweier Erdgasbohrungen dieser Firma Verunreinigungen mit thermogenem, also unter Hitzeeinwirkung entstandenem Methan aus großen Tiefen. Es lässt sich von biogenem Methan unterscheiden, das von Mikroorganismen unter Sauerstoffabschluss in jenen oberflächennahen Gesteinsschichten produziert wird, in denen sich das Grundwasser befindet. Zudem behauptete die EPA, das Wasser einer der Brunnen enthalte Substanzen wie Benzol, die manchmal als Zusatz beim Fracking dienen, und sei entflammbar. Deshalb wies die Behörde das Unternehmen an, den betroffenen Parteien sauberes Wasser zu liefern. Außerdem sollte die Firma untersuchen, ob auch andere Brunnen in der Nähe verunreinigt seien.

Range Resources erhob Einspruch und bestritt vor einem Berufungsgericht jegliche Verantwortung unter Hinweis auf die vorhandenen »langen horizontalen und vertikalen Distanzen«. Überraschenderweise nahm die EPA Ende März ihre Zwangsmaßnahme vorläufig zurück, weil sie diese ohne vorherige Anhörung der Firma verhängt und ein anderes US-Gericht in einem ähnlichen Fall inzwischen das Recht auf eine solche Anhörung bestätigt hatte. Aber selbst wenn, wie die Umweltbehörde meint, Range Resources verantwortlich ist, muss nicht unbedingt das Fracking tief in der Erde das Problem verursacht haben. Daher verlangte die EPA auch von

Fracking in Deutschland

Hier zu Lande spielt Fracking bisher keine große Rolle. Es wurde seit den 1960er Jahren gelegentlich bei herkömmlichen vertikalen Erdgasbohrungen in großen Tiefen eingesetzt. In Verbindung mit unkonventionellen Lagerstätten und Horizontalbohrungen kam es dagegen nur ganz vereinzelt probeweise zur Anwendung.

Das könnte sich allerdings ändern. Die herkömmlichen deutschen Erdgasreserven von geschätzten 133 Milliarden Kubikmetern werden bei der momentanen jährlichen Förderung von rund 13 Milliarden Kubikmetern, die etwa ein Sechstel des heimischen Bedarfs deckt, voraussichtlich in zehn Jahren erschöpft sein. Daneben gibt es jedoch größere Mengen an unkonventionellen Vorkommen in Schiefergesteinen, Sand- oder Kalksteinhorizonten und Kohleflözen (Karte rechts). Der genaue Umfang ist allerdings noch ziemlich unsicher. Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe erstellt gerade eine Studie dazu und hat im April erste Ergebnisse vorgelegt. Demnach bewegen sich die mutmaßlichen Vorräte zwischen 0,7 und 2,3 Billionen Kubikmetern, wovon aber wohl nur 10 bis 30 Prozent tatsächlich gewinnbar wären.

Die Förderung dieses Erdgases würde den Einsatz von Fracking in großem Maßstab erfordern. Tatsächlich hat die Industrie erhebliches Interesse daran. Das zeigt sich an der beträchtlichen und stetig steigenden Zahl an Konzessionen für Explorationsgebiete, die eine Reihe von Energieunternehmen erworben hat.

Ausgelöst durch Berichte über Verunreinigungen des Grundwassers in den USA, regt sich angesichts dieser Entwicklung auch in Deutschland Widerstand. Bürgerinitiativen haben sich gebildet, die ein Verbot des umstrittenen Verfahrens fordern – oder zumindest ein Moratorium, bis die Risiken geklärt sind. In Frankreich gibt es ein solches Moratorium bereits. Hier zu Lande wurde auf Bundesebene wenig unternommen. Exumweltminister Norbert Röttgen versprach nur, eine Studie in Auftrag zu geben, die Chancen und Risiken der unkonventionellen Erdgasförderung in Deutschland beurteilen soll. Den interessierten Firmen empfahl er, vorerst auf das Verfahren zu verzichten. Nach bisheriger Rechtslage hätte der Bund allerdings auch nicht die Befugnis, Verbote zu erteilen, da die Zuständigkeit bei den regionalen Bergämtern liegt.

Betroffen sind hauptsächlich zwei Bundesländer. In Nordrhein-Westfalen hatten die massiven Protesten aus der Bevölkerung teilweise Erfolg: Hier bleiben alle Anträge zur unkonventionellen Gasförderung einstweilen unbearbeitet, bis das Ergebnis einer jüngst ausgeschriebenen Risikostudie vorliegt. Niedersachsens Regierung steht dem Fracking wohlwollender gegenüber; vom Wirtschaftsministerium gibt es keine Einwände dagegen. Aber auch in diesem Bundesland regen sich Proteste verschiedenster Gruppen, so dass angekündigte Bohrungen auf unbestimmte Zeit verschoben wurden.

Um das Vertrauen der Bevölkerung zu gewinnen, hat die Firma ExxonMobil einen ungewöhnlichen Weg beschritten und 2011 im Internet einen »Informations- & Dialogprozess« initiiert (dialog-erdgasundfrac.de). Das Unternehmen beauftragte einen unabhängigen Expertenkreis, eine Risikostudie zu erstellen, und versprach, sich an das Ergebnis zu halten. Dieses liegt inzwischen vor und gibt Entwarnung mit Vorbehalten. Zwar bestehe kein sachlicher Grund für ein generelles Verbot des Frackings, doch seien eine Reihe strikter Bedingungen und Einschränkungen zu beachten.

Außerdem rief ExxonMobil einen Arbeitskreis aus »gesellschaftlichen Akteuren« ins Leben, die so Gelegenheit erhielten, ihre Anliegen vorzubringen sowie die Vorgehensweise und Ergebnisse des Expertenkreises kritisch zu bewerten. Schließlich konnte und kann, wer will, online Fragen stellen und Kommentare abgeben. Der Ausgang dieses Dialogs ist freilich offen.

Gerhard Trageser

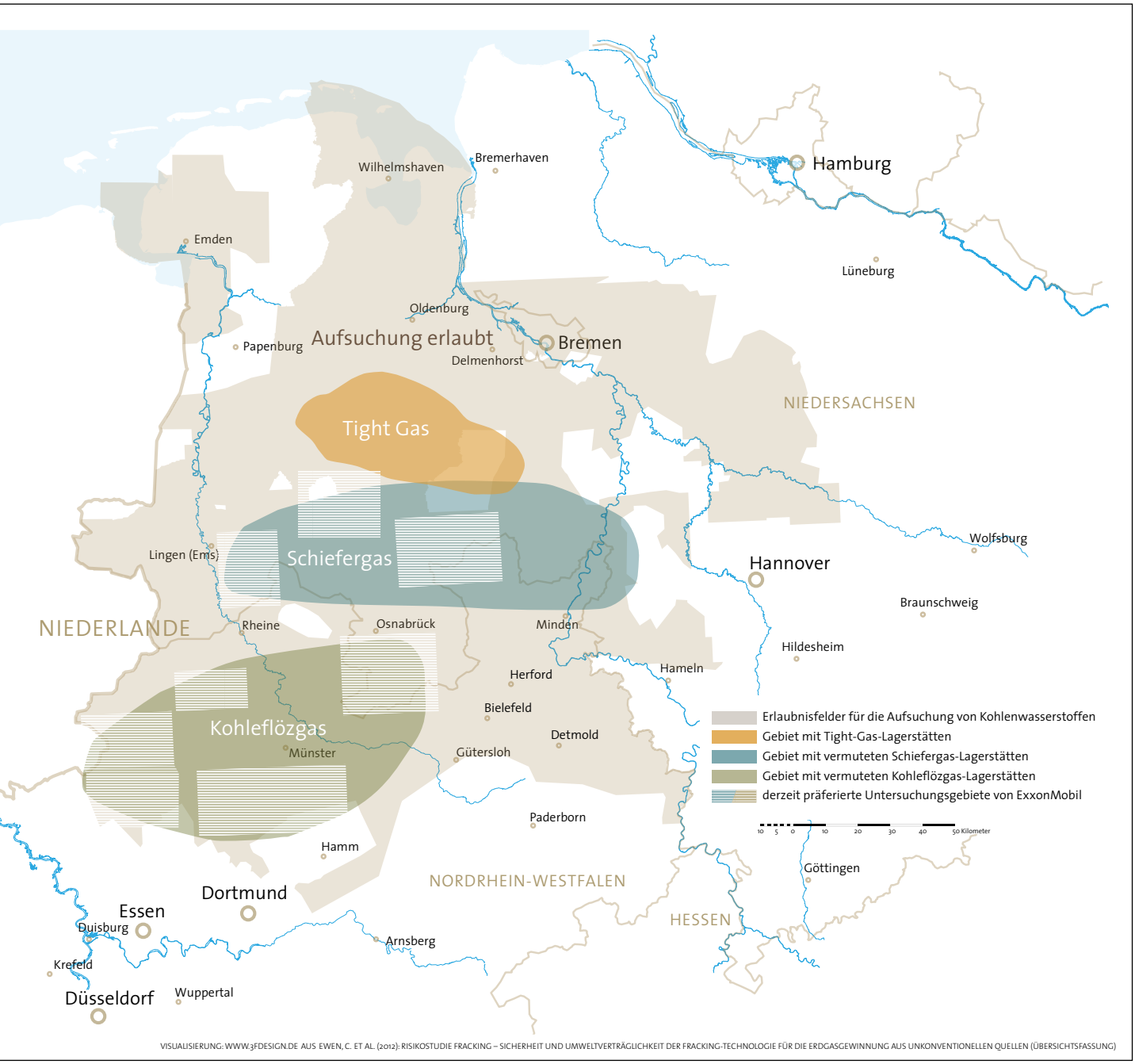
In Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen gibt es ausgedehnte Lagerstätten von Erdgas in Kohleflözen, in Schiefergesteinen und -tonen sowie in dichten Sand- oder Kalksteinhorizonten (Tight Gas). Die Grafik zeigt die mutmaßliche Ausdehnung dieser Vorkommen. Eingezeichnet sind außerdem die Gebiete, in denen Energieunternehmen bereits Konzessionen für Explorationsbohrungen erworben haben.

dem Unternehmen, zu ermitteln, wie das Erdgas an die Oberfläche gelangt sei.

Da gibt es viele Möglichkeiten. So könnte das Methan die gesamte Strecke vom aufgebrochenen Schiefergestein bis zur Oberfläche auf irgendeiner unbekannten Route zurückgelegt haben. Vielleicht entwich es aber auch aus einem Leck in einem der einzementierten Rohre im vertikalen Teil des Bohrlochs, das sich viel näher an den Grundwasser führenden Schichten befand.

In der Tat gilt eine schadhafte Zementabdichtung als Hauptquelle von Verunreinigungen im Boden bei der Erdgasförderung. Ein solcher Defekt hat laut Definition der Industrie jedoch nichts mit dem Fracking zu tun. Auf dem Weg nach unten muss jede Bohrung die oberflächennahen, Grundwasser führenden Gesteinsschichten passieren. Dabei trifft sie möglicherweise auch auf unbekannte, kleinere Erdgastaschen. Damit kein Gas an der Außenseite des Leitungsrohrs aufsteigen und von dort ins Grundwasser übergehen kann, wird deshalb die Lücke zwischen ihm und der Wand des Bohrlochs mit Zement gefüllt. Durch ein Leck in dieser Verschalung könnte aber nicht nur Gas, sondern auch der mit Chemikalien belastete Flowback austreten, der nach dem Aufbrechen des Schiefers unter hohem Druck nach oben zurückströmt.

Aus diesem Grund hält der Hydrogeologe Anthony Gorody, der als Berater von Erdgasfirmen das Fracking im Prinzip



VISUALISIERUNG: WWW.3FDESIGN.DE AUS EWEN, C. ET AL. (2012): RISIKOSTUDIE FRACKING – SICHERHEIT UND UMWELTVERTRÄGLICHKEIT DER FRACKING-TECHNOLOGIE FÜR DIE ERDGASGEWINNUNG AUS UNKONVENTIONELLEN QUELLEN (ÜBERSICHTSFASSUNG)

befürwortet, die Zementummantelung für die offensichtliche Schwachstelle des Verfahrens. Andere Wissenschaftler pflichten ihm bei. »Wenn Sie beim Verschalen der Bohrung nachlässig arbeiten, schaffen Sie möglicherweise ein Leck«, erklärt der Ökologe Robert B. Jackson von der Duke University in Durham (North Carolina). Obwohl viele Bestimmungen die Zementierung regulieren und die Industrie bestrebt war, ihre Verfahren zu verbessern, dürfte das Problem nicht vollständig in den Griff zu bekommen sein. »Ein erheblicher Prozentsatz der Zementverschalungen hält nicht dicht«, sagt Ingraffea. »Das wird immer so sein, es gehört einfach dazu.«

Fehlerhafte Ummantelungen sind für zahlreiche Fälle von Grundwasserkontamination im Zusammenhang mit neuartigen Erdgasbohrungen verantwortlich – so auch für den erwähnten, mit einer Million Dollar geahndeten Verseuchungsfall durch die Firma Chesapeake. Unter diesen Umständen könnte man sich auf den Standpunkt stellen, dass am Fracking an sich nichts auszusetzen sei und lediglich strengere Regeln nötig wären, um die Firmen beim Bohren gründlich zu überwachen.

»**Fehlerhafte Zementverschalungen** von Bohrlöchern sind für viele Fälle von **Kontamination des Grundwassers beim Fracking** verantwortlich«

Die unergründlichen Wege des Methans

Doch bleibt die Frage, ob nicht auch andere Ursachen für Verunreinigungen in Frage kommen. »Die Migration von Methan stellt in einigen Gebieten vermutlich ein Problem dar«, meint Engelder. Eine Untersuchung dazu hat kürzlich eine Gruppe um Jackson veröffentlicht. Ihr heiß debattierter Artikel gibt sowohl den Umweltschützern als auch der Industrie teilweise Recht. Jacksons Team analysierte Proben aus mehr als 60 privaten Trinkwasserbrunnen, die über dem Marcellus-Schiefer im Nordosten von Pennsylvania und über dem Utica-Schiefer in den ländlichen Gebieten des Bundesstaats New York liegen. In 51 Fällen fand sich Methan. Brunnen in der Nähe von Bohrplätzen enthielten wesentlich größere Mengen von dem Gas als andere. Wie chemische Analysen zeigten, war das meiste Methan thermogen; es stammte also nicht von Mikroorganismen in Oberflächennähe, sondern kam aus großen Tiefen.

Allerdings enthielt keine der Proben Fracking-Flüssigkeiten oder Salzlaugen aus tiefen Schiefergesteinsschichten. Auch Jackson hält daher eine fehlerhafte Zementierung und Verschalung der Bohrschächte für die wahrscheinlichste Ursache der Verunreinigungen. Dennoch stellt er eine weitere Möglichkeit zur Diskussion. Vielleicht setzen sich zumindest einige der beim Fracking entstandenen Risse im Gestein über die horizontale Schieferschicht hinaus fort. Diese Risse könnten sich mit bereits vorhandenen Spalten oder Durchlässen verbinden und es dem Gas so ermöglichen, weit nach oben zu steigen. Der Nordosten von Pennsylvania und die ländlichen Gebiete des Bundesstaats New York sind »mit alten, aufgegebenen Erdgasbohrungen übersät«, konstatiert Jackson. »Seinerzeit wurden die Schächte weder verschalt noch nach beendeter Nutzung verschlossen. Stellen Sie sich einen Schweizer Käse aus Bohrlöchern vor, die einige hundert Fuß in die Tiefe reichen. Und niemand weiß, wo sie sich befinden.«

Doch wenn Methan bei den neuartigen Erdgasbohrungen in das Trinkwasser gelangt, warum trifft das nicht auch für die Fracking-Chemikalien zu? Hierüber können Jackson und Engelder nur Vermutungen anstellen. Direkt nach dem Fracking, so ihre Überlegung, entweicht das freigesetzte Methan noch heftig genug, um chemikalienbelastetes Wasser durch das Bohrloch zurück nach oben zu befördern. Aber der Überdruck lässt schnell nach. Anschließend hat zwar das Gas genügend Auftrieb, um aufzusteigen, nicht jedoch das Wasser.

Dennoch kann im Prinzip auch von den Chemikalien ein Risiko für das Grundwasser ausgehen, sofern hydraulisch erzeugte Risse sich mit vorhandenen Spalten oder alten Bohrlöchern verbinden. Kevin Fisher, Ingenieur bei Pinnacle, einem Serviceunternehmen von Halliburton, hat 15 000 Klüfte in horizontalen Bohrschächten in den Schieferformationen Barnett und Marcellus untersucht und ihre Ausdehnung mit einem Messgerät für Mikrobeben ermittelt. Im Marcellus-Schiefer erstreckten sich die längsten Risse bis fast 600 Meter über das Schachtniveau. Damit bleibe noch ein ziemlich dicker Puffer, »eine sehr wirksame physische Barriere zwischen den Enden der hydraulisch erzeugten Frakturen und den Grundwasserleitern«, so Fisher.

Nach Ansicht einiger Ingenieure geben die Resultate ähnlicher Untersuchungen anderswo jedoch sehr wohl Anlass zur Besorgnis. In British Columbia (Kanada) erfassten die Aufsichtsbehörden 18 Fälle, in denen die bei neuen Erdgasbohrungen entstandenen Risse unerwartet Verbindungen zu anderen, bis zu 600 Meter entfernten Schächten hergestellt hatten. Laut Erdöl- und Erdgaskommission von British Columbia »hat sich die Fortpflanzung von Brüchen beim großräumigen hydraulischen Fracking als schwer vorhersagbar erwiesen«. Die Behörde warnte, dass die Risse länger werden können als erwartet, wenn die darüberliegenden Gesteinsschichten Schwachstellen aufweisen.

All diese Erkenntnisse liefern freilich keinen wirklichen Beweis für die direkte Kontamination eines Grundwasserleiters durch Fracken einer horizontalen Schiefergesteinsschicht. Wie die Leiterin der EPA, Lisa Jackson, kürzlich erklärte, ist bisher kein solcher Fall dokumentiert. Entwarnung gab auch jüngst eine groß angelegte Analyse aller vorliegenden Berichte aus drei Fracking-Gebieten durch ein Team um Charles Groat und Danny Reible von der University of Texas in Austin. Über das Ergebnis berichteten die beiden Forscher auf der jüngsten Jahrestagung der American Association for the Advancement of Science (AAAS) im Februar in Vancouver (Kanada).

Wenn sich eine Sache nicht beweisen lässt, heißt das freilich nicht, dass sie nicht existiert. Jeder Bohrplatz weist andere Charakteristika auf. Die »New York Times« und die Environmental Working Group, eine amerikanische Umweltorganisation, deckten kürzlich einen mutmaßlichen Verunreinigungsfall von 1984 auf. Sie behaupten, damals hätte sich eine gefrackte Erdgasbohrung in West Virginia mit einem alten, aufgelassenen Bohrloch in unmittelbarer Nähe überkreuzt, wodurch Trinkwasser verseucht worden sei. Die Industrie bezweifelt das jedoch.

Mit Computersimulationen zu neuen Erkenntnissen?

Für ein endgültiges Urteil über das Fracking, gleich ob im engen oder weit gefassten Sinn, sind einfach mehr Daten erforderlich. Die schon erwähnte EPA-Studie wird sie eventuell liefern. Sie befasst sich mit den diversen Möglichkeiten, wie bei Bohrungen die Grundwasserleiter kontaminiert werden könnten. Die Palette reicht von nicht abgedichteten, lecken Speicherbecken über fehlerhafte Zementierung von Bohrschächten bis hin zu potenziellen Verbindungen zwischen tief in der Erde verborgenen Brüchen und der Oberfläche. Die EPA nimmt fünf mutmaßliche Fälle von Grundwasserverunreinigung unter die Lupe, um die jeweilige Ursachen festzustellen. Außerdem wird sie zwei Bohrungen von Anfang bis Ende komplett überwachen. Eine wichtige Rolle spielen auch Computermodelle, um rechnerisch zu ermitteln, was sich unter Tage abspielt, wo keine direkten Beobachtungen möglich sind.

Ingraffea rät zu einer groß angelegten Simulation, die mehrere Erdgasbohrungen und horizontale Schächte innerhalb einer Kubikmeile (4,168 Kubikkilometer) umfasst. Sie soll über einen Bohrzeitraum von mehreren Wochen hinweg die Bewegungen von Gasen und Flüssigkeiten sowie die Bildung von Rissen im Gestein nachvollziehen und so Aussagen über die Wahrscheinlichkeit einer Kontamination erlauben. Der Aufwand wäre enorm. »Dazu bräuchte es mehrere Supercomputer«, sagt Ingraffea. Doch die Mühe lohne sich; zumindest würde ein solches Modell aufdecken »unter welchen Voraussetzungen Erdgasmigration am ehesten möglich ist«.

Das von Wissenschaftlern verwendete Standardprogramm für derartige Simulationen, das auch die EPA benutzt, ist derzeit Tough2. Ingraffea hält es jedoch nicht für leistungsfähig genug. Seiner Ansicht nach dürfte es schwierig sein, damit »alle Daten über Verwerfungen, Verbindungsstellen und Fortsetzungen von Brüchen« detailliert genug zu verarbeiten, um festzustellen, wann eine eigenständige neue Leitungsbahn entsteht, die eine ungewollte Fließbewegung ermöglichen würde. Große Konzerne benutzen ihre eigenen Programme, die laut Ingraffea sehr viel leistungsfähiger, aber eben Betriebsgeheimnis seien. »Die klügsten Köpfe sowie die besten Modelle und Daten finden sich allesamt bei Bohrfirmen und Serviceunternehmen«, klagt der Forscher.

Unterdessen sind sich Gorody und Lisa Jackson darin einig, dass die EPA chemische Untersuchungen in Trinkwasserbrunnen vor und nach dem Beginn neuer Erdgasbohrungen vornehmen sollte. Chemikalien, die erst später auftreten, würden das Standardargument der Industrie widerlegen, das Wasser sei auf natürliche Weise verunreinigt worden und die Anwohner hätten dies zuvor nur nicht bemerkt.

Geoffrey Thyne, Erdölgeologe am Enhanced Oil Recovery Institute der University of Wyoming in Laramie, macht einen anderen Vorschlag zur Lösung des Fracking-Rätsels: Die Unternehmen sollen verpflichtet werden, ihrem jeweiligen Chemikaliencocktail einen leicht nachweisbaren, nicht natürlich vorkommenden Indikatorstoff beizufügen. Falls dieser irgendwo unerwartet auftaucht, wäre das ein untrügliches Zeichen für eine Verunreinigung durch das Fracking. Thyne hält das für »relativ leicht machbar«, schränkt aber ein: »Die Industrie ist wenig begeistert von diesem Vorschlag.« Die EPA will ihn zumindest »erwägen«. Im Übrigen hat sie von den Firmen sehr wohl detaillierte Angaben über deren Fracking-Additive, kann sie aber nicht öffentlich machen, weil viele als »vertrauliche Betriebsinformation« klassifiziert sind. Nur neue Gesetze würden diese Situation ändern.

Auch wenn die Untersuchungen durch die EPA und andere Institutionen Klarheit über die strittigen Punkte bringen, kommt das im Grunde zu spät. Fracking »ist nie sorgfältig untersucht worden«, sagt Amy Mall, führende Politikanalystin am Natural Resources Defense Council, einer gemeinnützigen Umweltschutzorganisation aus New York City. »Es handelt sich um ein großes Experiment, das ohne solide wissenschaftliche Basis durchgeführt wird.« ~

DER AUTOR

Chris Mooney ist einer der Moderatoren des Podcasts Point of Inquiry (www.pointofinquiry.org), das sich kritisch mit Fragen aus Wissenschaft, Religion, Philosophie und Politik auseinandersetzt, und Autor von drei Büchern, darunter »The Republican War on Science«.

QUELLEN

New York State Department of Environmental Conservation: Revised Draft Supplemental Generic Environmental Impact Statement On The Oil, Gas and Solution Mining Regulatory Program. 7. September 2011

Osborn, S.G. et al.: Methane Contamination of Drinking Water Accompanying Gas-Well Drilling and Hydraulic Fracturing. In: Proceedings of the National Academy of Sciences USA 108, S. 8172–8176, 2010

WEBLINKS

www.umweltbundesamt.de/chemikalien/publikationen/stellungnahme_fracking.pdf
Informationen des Umweltbundesamts zum Fracking

http://dialog-erdgasundfrac.de/risikostudie-fracking
Risikostudie von Experten im Rahmen des »Informations- & Dialogprozesses« der ExxonMobil

www.unkonventionelle-gasfoerderung.de
Website mit kritischen Informationen zum Thema

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1155299**

Bücher und mehr

David Graeber

SCHULDEN

Die ersten 5000 Jahre

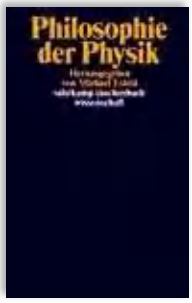
2012, 536 S., geb., Klett-Cotta

Bestell-Nr. 3633

€ 26,95 (D), € 27,80 (A)

Ein radikales Buch im doppelten Wortsinn, denn Graeber packt das Problem der Schulden an der Wurzel, indem er bis zu ihren Anfängen in der Geschichte zurückgeht. Das führt ihn mitten hinein in die Krisenherde unserer Zeit: Von der Antike bis in die Gegenwart sind revolutionäre Bewegungen immer in Schuldenkrisen entstanden. Ein ebenso radikaler wie befreiender Blick auf die Wurzeln unserer Schuldenkrise.

Bestellen +49 6221 9126-841
Sie direkt: @ info@science-shop.de



Herausgegeben von Michael Esfeld

PHILOSOPHIE DER PHYSIK

2012, 481 S., kart., Suhrkamp

Bestell-Nr. 3621

€ 18,00 (D), € 18,50 (A)

Seit ihren Anfängen bei den Vorsokratikern sind Philosophie und Physik eng miteinander verbunden. Dieser Band soll die Vielfalt und Lebendigkeit der philosophischen Auseinandersetzung mit der Physik im deutschsprachigen Raum heute aufzeigen.

Mitarbeit: Stefan Heusler

QUANTEN-DIMENSIONEN, DVD-ROM

Doppelspalt
Verschränkung
Quantencomputer

2010, in DVD-Box., für PC und Mac, Lehr-Programm gem. § 14 JuSchG., Klett, Sciencemotion

Bestell-Nr. 3552 € 29,95 (D), € 29,95 (A)

Diese ausgefuchste Lernsoftware bringt Licht in die mysteriöse Quantenwelt!

Mit den beiden Detektoren Alice und Bob begeben wir uns auf die faszinierende Reise in die Quantendimensionen von Licht. Wie lässt sich Licht beschreiben, woraus besteht es und wie verhält es sich? Auf der Suche nach Antworten nähern wir uns dem Licht auf zwei verschiedene Weisen – im Spielfilm »Schattenwelten« und anhand von 14 Lernstationen auf der U-Bahn-Linie 1, der Nonlocality Line. Diese Lernsoftware zur Quantenphysik wurde von Physikdidaktikern der Universität Münster entwickelt. Ein großer Spaß für alle Physikinteressierten und auch ideal für den Unterricht in der Oberstufe.

Stefan Ineichen, Bernhard Klausnitzer, Max Ruckstuhl

STADTFAUNA

600 Tierarten unserer Städte

2012, 434 S. m. 600 Farbfotos, geb., Haupt

Bestell-Nr. 3521

€ 29,90 (D), € 30,80 (A)

Von der Laus bis zum Wildschwein – 600 tierische Stadtbewohner im Porträt!

Städte sind nicht nur von Menschen bewohnt, sondern bieten auch einer großen Vielfalt von Tieren Wohnraum und Nahrung. Diesen erstaunlichen Artenreichtum macht die »Stadtfauna« sichtbar. Die allesamt mit Farbfotos illustrierten, von Spezialisten verfassten Artporträts geben Auskunft über Lebensweise und Verbreitung der Tiere, die städtische Gärten und Gebäude, Bahnareale und Blumenwiesen, Gewässer und Stadtwälder besiedeln. Das hier vereinigte Wissen stellt einen einzigartigen Überblick über die städtische Fauna in Mitteleuropa dar.

Michael Stocker, Sebastian Meyer

WILDTIERE

Hausfreunde und Störenfriede

2012, 352 S. m. 120 Farbfotos u. 100 Zeichn, geb., Haupt

Bestell-Nr. 3522

€ 29,90 (D), € 30,80 (A)

Dieses Buch lädt ein auf einen Rundgang durch Haus und Garten, aufs Dach und auf den Dachboden, ans Fenster und auf den Balkon, an die Fassade und in Innenräume und Keller. Mit Tierporträts und Tipps fürs Beobachten bietet es spannendes Wissen rund um die Natur in der Nähe.

AußerdemTipps und Anleitungen: mit Bauplänen für Nisthilfen, Wissen fürs Bauen und Renovieren, Vorschläge fürs Entschärfen von Tierfallen.

Carsten Könneker

WISSENSCHAFT KOMMUNIZIEREN

Ein Handbuch mit vielen praktischen Beispielen

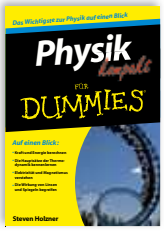
2012, XII, 204 S. m. 30 SW- u. 50 Farbabb., kart., Wiley-VCH

Bestell-Nr. 3612

€ 24,90 (D), € 25,60 (A)

Dieses Buch ist eine unverzichtbare Hilfe für alle Naturwissenschaftler und Studenten, die ihre Arbeit gegenüber verschiedenen Zielgruppen besser kommunizieren wollen; seien dies Laien, Medien, Drittmittelgeber oder Kollegen anderer Fachbereiche. Das Buch erklärt die gute Praxis von Meldungen, Pressemeldungen, Artikeln, Kommentaren, Vorträgen, Drittmittelanträgen, Weblogs usw. anhand von vielen Beispielen aus der medialen Praxis.

Besuchen Sie uns im Internet unter:
www.science-shop.de



Steven Holzner

PHYSIK KOMPAKT FÜR DUMMIES

Ein Grundkurs

2012, 224 S., kart., Wiley-VCH

Bestell-Nr. 3548

€ 10,– (D), € 10,30 (A)

Dieses Büchlein verhilft zu einem schnellen Überblick über die Physik . Steven Holzner erklärt leicht verständlich, was Sie über Kräfte und Bewegungen, Energie, Wärme, Licht, elektrische Felder und Kernphysik unbedingt wissen sollten.

Bernd Pröschold

STERNSTUNDEN, DVD-VIDEO

Landschaften im Rhythmus des Kosmos

2011, Laufzeit ca. 53 Min., 10 Seiten Booklet

Bestell-Nr. 3630 € 15,90

Siebzehn Zeitrafferaufnahmen präsentieren den Sternenhimmel über aufregende Orte unserer Erde! Das Sternenmeer der Milchstraße, der Tanz der Polarlichter, das Wechselspiel von Tag und Nacht – das sind die Leitmotive dieser DVD. Die bis zu 24-stündigen Aufnahmen werden von Musik begleitet. Drehorte: Norwegen, Dänemark, Deutschland, Österreich, Schweiz, Frankreich, Kroatien, Kanar. Inseln, Chile

Als Extras bietet Ihnen die DVD ein Making-of und ein Begleitwort von Ranga Yogeshwar im Booklet.

Lieferbar auch als Blu-ray unter:
www.science-shop.de/artikel/1151887

Klaus Schmeh

NICHT ZU KNACKEN

Von ungelösten Enigma-Codes zu den Briefen des Zodiac-Killers

2012, 224 S. m. Abb., geb., Hanser Wirtschaft Wissen Weltgeschehen

Bestell-Nr. 3519

€ 18,90 (D), € 19,50 (A)

Die meisten Rätsel der Kryptologie sind heute gelöst – jedoch nicht alle. Der Kryptologie-Experte Klaus Schmeh hat die bedeutendsten ungeknackten Codes der Verschlüsselungsgeschichte zusammengetragen.

Patrick Wyse Jackson

PALÄONTOLOGIE FÜR NEUGIERIGE

Was Sie schon immer über Fossilien, Erdgeschichte und Evolution wissen wollten

2012, 95 S. m. 60 Farbabb., geb., Primus Verlag

Bestell-Nr. 3532 € 19,90 (D), € 20,50 (A)

Eine kompakte Einführung in die Paläontologie!

Patrick Wyse Jackson erklärt anschaulich, wie und warum Fossilien erhalten blieben, wie sie klassifiziert werden und welche Informationen sie über die Geschichte der Erde liefern.

Die großen Fragen behandeln grundlegende Probleme und Konzepte in Wissenschaft und Philosophie. Anspruch der ambitionierten Reihe ist es, die Antworten auf diese Fragen zu präsentieren und damit die wichtigsten Gedanken der Menschheit in einzigartigen Übersichten zu bündeln.

Tony Crilly

DIE GROSSEN FRAGEN: MATHEMATIK

2012, 208 S. m. 70 Abb. u. 14 Tab., geb., Spektrum Akademischer Verlag

Bestell-Nr. 3516

€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Im Band Mathematik, der einen Bogen spannt vom Beginn des Zählens und den idealen platonischen Körpern bis zur Chaostheorie und dem Fermat'schen Theorem, setzt sich Tony Crilly mit jenen 20 Fragen auseinander, die das Herz der Mathematik und unseres Verständnisses der Welt bilden.

Stuart Clark

DIE GROSSEN FRAGEN: UNIVERSUM

2012, 208 S. m. 15 Abb., geb., Spektrum Akademischer Verlag

Bestell-Nr. 3517

€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Im Band Universum geht Stuart Clark den 20 entscheidenden Fragen der Astronomie, Kosmologie und letztlich unserer Existenz nach.

Weitere lieferbare Bände der Reihe:

Michael Brooks

DIE GROSSEN FRAGEN: PHYSIK

Bestell-Nr. 3237 € 19,95 (D), € 20,60 (A)

Simon Blackburn

DIE GROSSEN FRAGEN: PHILOSOPHIE

Bestell-Nr. 3239 € 19,95 (D), € 20,60 (A)

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich

Lisa Randall

DIE VERMESSUNG DES UNIVERSUMS

Wie die Physik von morgen den letzten Geheimnissen auf der Spur ist

2012, 490 S. m. Abb., geb., Fischer

Bestell-Nr. 3496 € 24,99 (D), € 25,70 (A)

In ihrem neuen Buch berichtet die Physikerin Lisa Randall aus den Laboren und Denkfabriken ihrer Kollegen: Welchen Fragen gehen Physiker heute nach? Welche Rolle spielen so gigantische Apparate wie der Teilchenbeschleuniger LHC am CERN? Was hat es mit der Suche nach dem Higgs-Boson auf sich? Wie hängt angewandte mit theoretischer Physik zusammen?

Lisa Randall zeichnet das Bild der gegenwärtigen Physik in all ihren Facetten und lässt ganz konkret werden, wie die moderne Grundlagenforschung funktioniert.

% Sommerschnäppchen

Helmut Genaust

ETYMOLOGISCHES WÖRTERBUCH DER BOTANISCHEN PFLANZENNAMEN

2012, 704 S., geb., Lizenz: Birkhäuser, geb., Nikol

Bestell-Nr. 3541 Früher € 148,–,

jetzt nur € 9,99 (D), € 10,30 (A)

Das Buch vermittelt das Wissen über die Etymologie botanischer Pflanzennamen, also die Aufklärung über die Herkunft und Geschichte der wissenschaftlichen Gattungs- und Artnamen (einschließlich Bakterien, Algen, Pilzen, Moosen und Flechten) und gibt einen faszinierenden Einblick in die Geschichte der mannigfachen Beziehungen zwischen Pflanze und Mensch.

Andras Gedeon

FORTSCHRITTE DER MEDIZIN DURCH WISSENSCHAFT UND TECHNIK

99 wegweisende Veröffentlichungen aus 5 Jahrhunderten

2010, XII, 540 S., geb., Spektrum

Bestell-Nr. 3027

früher € 59,95, jetzt nur € 19,95 (D), € 20,60 (A)

Dieser aufwändige Farbbildband ist eine Sammlung von 99 Essays über Meilenstein-Publikationen der letzten 500 Jahre aus dem weiten Feld wissenschaftlicher und technologischer Forschungsdisziplinen, die den Fortschritt der Medizin vorangebracht haben.

Alejandro Balaguer

AQUA MATER

Wahrheiten und Bilder · Anden · Amazonas · Mittelamerika · Antarktis

2007, 260 S., mehr als 150 Farbabb., Kunstdruckpapier, Großformat, deutsch/englisch, geb., Graph Ediciones

Bestell-Nr. 3486 Früher € 39,90,

jetzt nur € 14,95 (D), € 15,40 (A)

Eindrucksvolle Bilder und Texte führen uns auf eine zauberhafte Reise zu Seen und Flüssen, Wasserfällen und Gletschern, Bergen, tropischen Wäldern und dem Eis der Antarktis.

Volker Reinhardt

ROM

Ein illustrierter Führer durch die Geschichte

1999, 287 S. m. 104 meist farb. Abb., 1 zweifarb. Stadtplan, geb., Beck

Bestell-Nr. 3489 Früher € 19,90,

jetzt nur € 9,95 (D), € 10,30 (A)

Die zweieinhalbtausendjährige Geschichte der Stadt wird hier aus den sichtbaren Zeugnissen ihrer Vergangenheit erzählt und gedeutet. Ein historisches Gesamtbild, ein neuartiger und lebendiger illustrierter Stadt- und Geschichtsführer für alle Romreisenden mit über 120 weit gehend farbigen Abbildungen.

Werner Bils

BIOLOGISCHES WISSEN IN FRAGE UND ANTWORT, 4 BÄNDE MIT CD-ROM

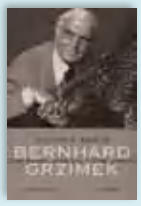
899 Aufgaben und Lösungen zu Zoologie und Botanik, Zellbiologie und Genetik, Evolution, Ökologie und Verhalten, Humanbiologie und Tierphysiologie

2012, 1056 S. m. zahlr. farb. Abb., kart., Quelle & Meyer

Bestell-Nr. 3619 Früher € 79,80,

jetzt nur € 39,95 (D), € 41,10 (A)

Die Vermittlung biologischen Wissens ist sowohl an allgemeinbildenden Schulen als auch in außerschulischen Bildungseinrichtungen eine komplexe und daher schwierige Aufgabe. Aber was ist mit der Überprüfung des erlernten Stoffes? Welche Fragen sollen sinnvoller Weise gestellt werden? Woher nimmt man diese und, vor allem, die richtigen Antworten zur Kontrolle? Ganz einfach: aus der vierbändigen Reihe Biologisches Wissen in Frage und Antwort!



Claudia Sewig

BERNHARD GRZIMEK

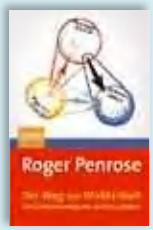
Der Mann, der die Tiere liebte. Biografie

2009, 447 S., 64 z. T. farb. Fotos auf Taf., geb., Lübbe

Bestell-Nr. 3482 Früher € 24,95,

jetzt nur € 7,95 (D), € 8,20 (A)

Die abenteuerlichen Afrikareisen seit Beginn der 1950er Jahre, der Kinofilm »Serengeti darf nicht sterben«, »Ein Platz für Tiere«, die zahllosen Bücher und das beharrliche Werben für den Naturschutz – der Name Bernhard Grzimek weckt auch heute noch zahlreiche Erinnerungen. Claudia Sewig zeichnet ein differenziertes Bild des großen Tierfilmers und Zoodirektors – eine widersprüchliche Persönlichkeit, deren Arbeit bis heute fortwirkt.



Roger Penrose

DER WEG ZUR WIRKLICHKEIT

Die Teilübersetzung für Seiteneinsteiger

2010, XII, 244 S. m. 50 Abb., geb., Spektrum

Bestell-Nr. 3021 früher € 24,95,

jetzt nur € 9,95 (D), € 10,30 (A)

Der Weg zur Wirklichkeit ist eine Kurzübersetzung des Penrose-Klassikers *The Road to Reality,* die aus dem Monumentalwerk für Physik- und Mathematikexperten die allgemeinverständlichen Kapitel für Laien lesbar macht. Wer ein Faible für die Grundfragen der Wissenschaft hat, findet in diesem klar und kompetent geschriebenen Buch überraschende Ideen.

Graphen aus dem Chemielabor

Ein erst vor acht Jahren entdecktes Material aus Kohlenstoff, das nur eine Atomlage dick ist, könnte die Elektronik revolutionieren. Allein – bislang fehlen geeignete Herstellungsmethoden. Doch Chemiker sind dabei, sie zu entwickeln.

Von Klaus Müllen

In den 1980er Jahren sang Madonna: »We are living in a material world«. Zwar meinte der Popstar damit die vorherrschende materialistische Einstellung des Westens, aber ihre Aussage stimmt auch im wörtlichen Sinn: Wir leben in einer Welt, die von Materialien geprägt ist. Ohne Kunststoffe, Metalle oder Halbleiter müssten wir auf die meisten Annehmlichkeiten des modernen Lebens verzichten. Neue Materialien sind stets auch die Voraussetzung für neue Technologien. So hat erst die Entdeckung von Flüssigkristallen jene LCD-Flachbildschirme ermöglicht, die inzwischen die noch vor wenigen Jahren üblichen Kathodenstrahlröhren fast vollständig verdrängt haben. Desgleichen existieren nur dank der Entwicklung von Metalllegierungen mit speziellen magnetischen Eigenschaften mittlerweile Festplatten mit gigantischen Speicherkapazitäten von mehren Terabytes.

Gerade die Elektronik profitiert besonders häufig von neuen Materialen – und ist auf sie angewiesen, wenn sich ihre Leistungsfähigkeit weiter im bisherigen Tempo steigern soll. Als Hoffnungsträger Nummer eins gilt dabei aktuell das Graphen. Es besteht aus einer einlagigen Anordnung von Kohlenstoffatomen in Form eines Wabengitters. Diese »Wunderfolie« ist dem Silizium, dem Grundmaterial heutiger Computerchips und Solarzellen, in mehrfacher Hinsicht überlegen. Erstens können sich Ladungen darin wesentlich schneller bewegen (siehe Spektrum der Wissenschaft 8/2008, S. 86). Zweitens ist Graphen im Gegensatz zu Silizium transparent und eignet sich – anders als dieses – deshalb auch für Displays und Leuchtdioden. Und drittens hat es noch einen entscheidenden Vorteil gegenüber den gängigen Halbleitersubstraten: Man kann daraus im Prinzip wesentlich kleinere Schaltkreise bauen. Bei alldem ist das Material chemisch, thermisch und mechanisch sehr stabil.

Deshalb verwundert es nicht, dass die russischen Forscher Andre Geim und Konstantin Novoselov von der University of Manchester (England), die 2004 als Erste die besonderen Eigenschaften von Graphen erkannten, dafür nur sechs Jahre später den Nobelpreis für Physik erhielten (Spektrum der Wissenschaft 12/2010, S. 16). Ihr Herstellungsverfahren für das Material war allerdings mühselig und vergleichsweise primitiv. Sie nutzten aus, dass der von Bleistiftminen be-

AUF EINEN BLICK

WEGE ZUM WUNDERSTOFF

1 Graphen gilt als Hoffnungsträger Nummer eins für die künftige **Nanoelektronik**. Für Forschungszwecke wird es bisher von Hand mit Klebefolie von Graphit abgepellt – ein Verfahren, das sich nicht für die großtechnische Produktion eignet. Zudem weist das so erhaltene Material zahlreiche **Strukturfehler** auf.

2 Deshalb versuchen sich Chemiker an effizienteren Herstellungsmethoden, etwa indem sie Graphen schrittweise aus **Benzolringen** aufbauen. Doch ab einer gewissen Größe sind die entstehenden Moleküle kaum noch handhabbar.

3 Am besten lässt sich Graphen direkt auf einer Metalloberfläche synthetisieren. So ist es bereits gelungen, Proben mit über zehn Nanometer Durchmesser herzustellen. Außerdem konnten die Autoren auf diese Weise gezielt **Graphenbänder** einer vorgegebenen Breite oder Form erzeugen.

4 Das Verfahren ist jedoch aufwändig. Für technische Anwendungen genügt oft ein weniger perfektes Material, das sich mit einfacheren, groberen Methoden wie der **Pyrolyse** oder der Abscheidung aus der Gasphase gewinnen lässt – oder auch auf dem Umweg über **Graphenoxid**.

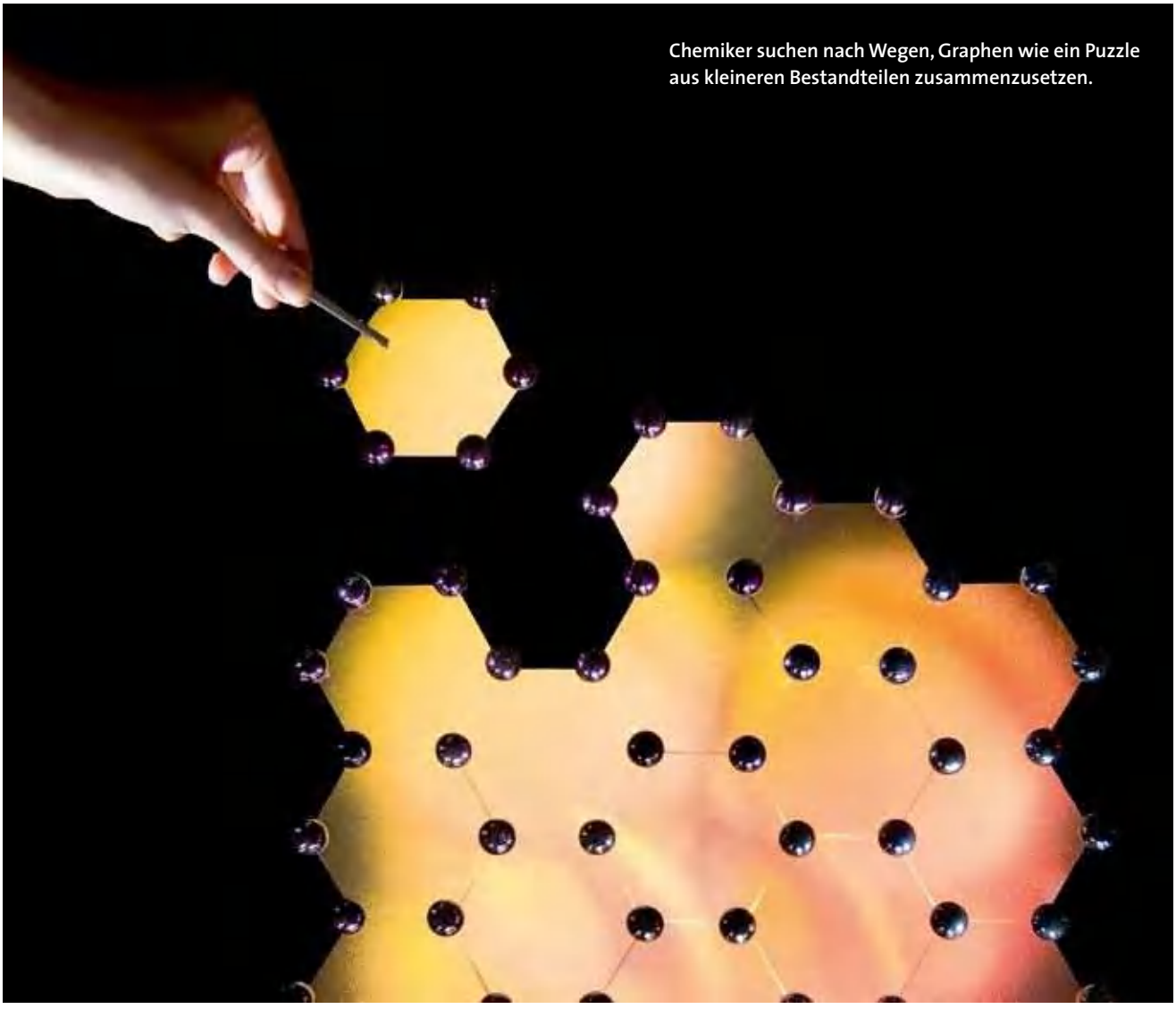
5 Auf diese Weise konnten die Autoren bereits Graphenschichten als Fensterelektroden für **Solarzellen** erzeugen. Außerdem ließen sich Metalloxidteilchen in Graphenhüllen verpacken, so dass sie ein besseres Elektrodenmaterial für **Lithiumionenbatterien** ergaben. Sogar ein Katalysator für **Brennstoffzellen** aus stickstoffdotiertem Graphen konnte hergestellt werden.

kannte Graphit aus aufeinandergestapelten Graphenmolekülen besteht. Mit Klebeband pellten sie deshalb ganz vorsichtig möglichst dünne Schichten davon ab. Diese übertrugen sie auf einen Siliziumwafer und prüften mit einer Kombination aus Mikroskopie und Spektroskopie die Dicke. Manchmal erwies sich die Schicht tatsächlich als lediglich einlagig, bestand also aus Graphen.

Mit diesem Verfahren lassen sich natürlich nur winzige Mengen des begehrten Materials erzeugen. Außerdem zeigt sich immer erst im Nachhinein, ob die Herstellung erfolgreich war: Wie dick oder groß die jeweils abgezogene Schicht ist, lässt sich weder vorhersagen noch regulieren. Überdies weist das so erhaltene Graphen zahlreiche Strukturdefekte auf, vor allem an den Rändern. All das schreit geradezu nach einem besseren Herstellungsverfahren.

Vor allem Chemiker fühlen sich herausgefordert, mit ihrer Stoffkenntnis und ihrem Methodenarsenal einen effizienten Syntheseweg zu finden. Ihr Ansatz unterscheidet sich dabei naturgemäß von dem der Physiker und Materialforscher. Diese versuchen aus einer größeren Struktur, dem Graphit, die kleinere Komponente, das Graphen, rein mechanisch herauszupräparieren. Chemiker bevorzugen dagegen die umgekehrte Vorgehensweise: Sie ersinnen Wege, das gewünschte Molekül wie beim Lego aus kleineren Bausteinen zusammenzusetzen.

Meine Mitarbeiter und ich haben in unseren eigenen Arbeiten aus der jüngsten Zeit beide Konzepte angewendet. Im Vordergrund stand dabei, die Struktur des jeweils hergestellten Materials möglichst genau zu kontrollieren und so gezielt Substanzen mit ganz bestimmten Eigenschaften zu erhalten. Deshalb machen wir es auch nicht wie die Polymerchemiker, die eine große Zahl an gelösten Molekülen einfach miteinander reagieren lassen, so dass diese sich zu langen Ketten verbinden; dabei entsteht ein Gemisch aus gleichartigen, aber unterschiedlich großen Molekülen. Wir orientieren uns eher an der Vorgehensweise organischer Chemiker, in-



Chemiker suchen nach Wegen, Graphen wie ein Puzzle aus kleineren Bestandteilen zusammenzusetzen.

DANIELA LEITNER

dem wir einzelne Molekülbausteine kontrolliert verknüpfen. Das hat den Vorteil, dass das Produkt jeweils eine genau definierte Größe, Form und Elektronenstruktur aufweist.

Im Übrigen sind wir nicht ganz und gar auf das Graphen fixiert. Vielmehr haben wir auch ein Auge für das, was bei der Herstellungsprozedur gewissermaßen am Wegesrand liegt, etwa in Form von Zwischen- oder Nebenprodukten. Ebenso folgen wir gelegentlich Seitenpfaden unserer Syntheseroute, wenn diese zu Produkten führen, die nützliche Anwendungen in der Materialwissenschaft versprechen.

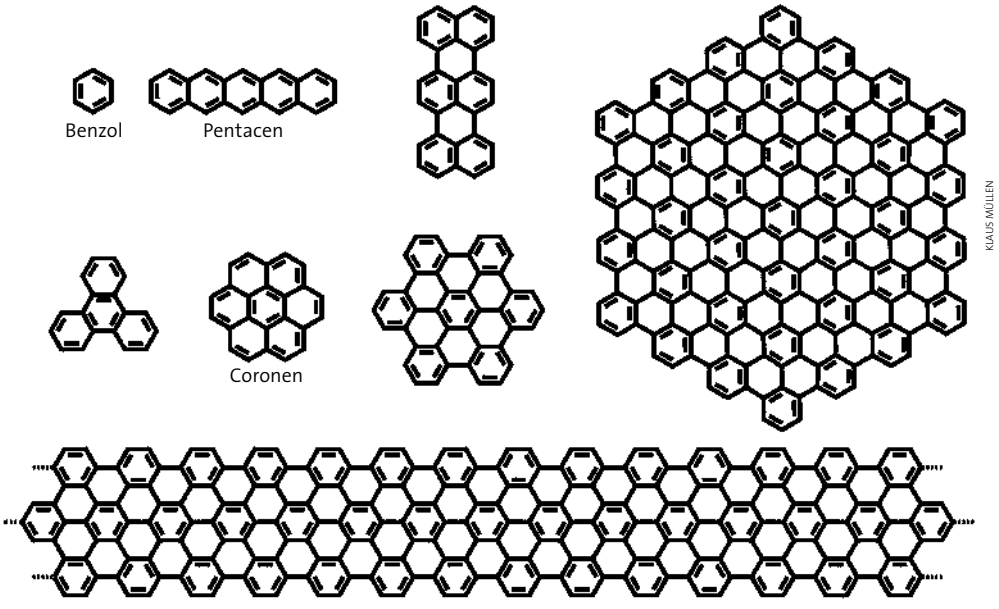
Ring für Ring in Richtung Graphen

Organische Chemiker befassen sich schon lange, vor allem aber seit den Pionierarbeiten von Erich Clar (1902–1987) in den 1930er Jahren, mit so genannten polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAKs). Dabei handelt es sich um kleine Teilstücke einer Graphenscheibe, sozusagen Minigraphene. Sie kommen im Steinkohleteer, aber auch in interstellarer Materie vor. Die kleinste Einheit eines solchen PAK-Moleküls und damit auch des Graphens ist das Benzol – eine ringförmige Verbindung aus sechs Kohlenstoffatomen, in der sich die Elektronen relativ frei bewegen können. An jedem Eck befindet sich noch ein Wasserstoffatom. Hängt man nun in Gedanken an dessen Stelle jeweils ein weiteres Benzolmolekül und verbindet es mit allen Nachbarringen, ergibt sich eine Art Superbenzol mit immerhin schon 42 Kohlenstoffatomen (Bild unten). Das lässt sich im Prinzip fortsetzen, wobei immer größere Verwandte entstehen. Letztendlich landet man so beim Graphen.

Die kleineren PAKs können Chemiker schon seit Langem mit etablierten Syntheseverfahren in allen Variationen problemlos herstellen. Mit Seitenlängen von etwa einem Nanometer sind sie zwar nur rund ein Tausendstel so groß wie die aus Graphit abgepellten Graphenproben, die in der Regel einige Mikrometer messen. Dennoch sind auch sie teilweise technisch durchaus interessant. Je nachdem, wie die sechsgliedrigen Kohlenstoffringe zusammengefügt sind, haben solche PAKs bestimmte Eigenschaften wie Farbe oder Leitfähigkeit. Das macht sie zu potenziellen Bausteinen für das gerade entstehende Gebiet der organischen Elektronik. Aber nicht nur die Zahl und Anordnung der Ringe lässt sich je nach gewünschter Anwendung in weiten Grenzen variieren. Auch andere chemische Modifikationen sind möglich, um die Eigenschaften noch gezielter an die jeweiligen Erfordernisse anzupassen. Insbesondere beeinflusst der Einbau von Schwefel- oder Stickstoffatomen in das Grundgerüst die elektronischen Eigenschaften des Moleküls.

Eine andere viel versprechende Option, die wir selbst verfolgen, besteht darin, bewegliche Kohlenwasserstoffketten an den starren Kern der scheibenförmigen PAKs anzufügen. Das bringt diese dazu, sich spontan übereinanderzustapeln. Entlang der entstehenden Säulen, welche die Form von Geldrollen haben, können dann elektrische Ladungen von Scheibe zu Scheibe hüpfen (siehe Bild rechts). Solche Transportkanäle für Ladungen bieten sich für elektronische Bauelemente an. Wichtig ist, eine möglichst hohe Ordnung innerhalb der Stapel zu erzielen. Außerdem kommt es darauf an, dass die Scheiben in definierter Weise relativ zu einer Unterlage – etwa einer Elektrode – orientiert sind. So können sie parallel oder senkrecht dazu ausgerichtet sein: Im ersten Fall stehen die Säulen aufrecht auf der Unterlage, im zweiten liegen sie seitlich nebeneinander. Die Kunst des Chemikers besteht also darin, nicht nur die gewünschten Moleküle herzustellen, sondern sie auch auf kontrollierte Weise in komplexen supramolekularen Hierarchien anzuordnen. Erst dadurch entsteht in der Regel ein technisch einsetzbares Material.

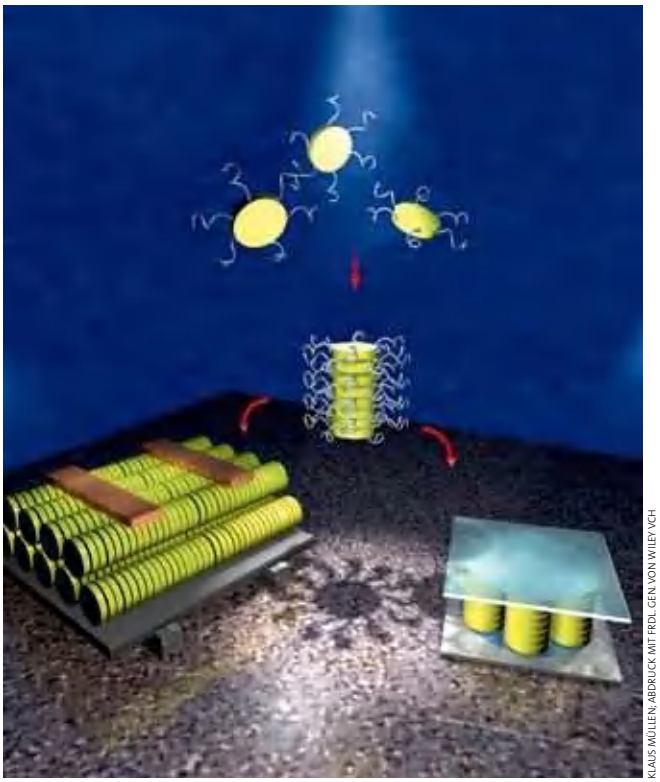
Trotz dieser vielfältigen Möglichkeiten, die relativ kleine PAK-Moleküle bereits bieten, stellten wir uns der Herausforderung, sie immer weiter zu vergrößern, um so letztlich Graphen herzustellen. Dafür haben wir eine besondere Synthesemethode entwickelt. Sie startet beim Diphenylethin ($C_6H_5–C{\equiv}C–C_6H_5$). Dabei handelt es sich um zwei durch eine



Als ringförmige Verbindung aus sechs Kohlenstoffatomen verkörpert Benzol gewissermaßen die Grundeinheit des Graphens. Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAKs), in denen mehrere Benzolringe in einer Art Kachelmuster aneinandergefügt sind, stellen größere Ausschnitte aus dem Graphen dar – einige haben die hier angegebenen Trivialnamen. An den Ecken sitzen jeweils noch Wasserstoffatome, die der Übersichtlichkeit halber weggelassen wurden.

Dreifachbindung verknüpfte Kohlenstoffatome, an denen jeweils ein Benzolring hängt. Drei solche Moleküle lassen sich mit Hilfe eines Kobaltkatalysators zum propellerförmigen Hexaphenylbenzol zyklisieren (siehe Bild S. 86). Dieses besteht aus einem zentralen Benzolring, an dessen sechs Ecken je ein weiterer solcher Ring angebunden ist. Die äußeren Ringe sind allerdings wie bei einem Windrad gekippt, weil sie sich gegenseitig räumlich behindern. Durch eine chemische Reaktion gelingt es jedoch, sie »platt zu schlagen«. Dabei verlieren sie zwei ihrer fünf Wasserstoffatome und verbinden sich direkt miteinander zum oben erwähnten Superbenzol. Im Verlauf dieser Reaktion entstehen zwischen ihnen zugleich sechs neue Sechsecke. Deshalb haben wir den Vorgang Cyclodehydrierung genannt. Sie kann chemisch durch ein Oxidationsmittel wie Eisen(III)-chlorid oder auch elektrochemisch durch Zufuhr von Elektronen an einer Kathode erfolgen.

Um mit dieser Reaktion immer größere Moleküle herzustellen, gilt es, durch Anhängen weiterer Benzolringe an den Seiten jeweils molekulare Propeller der nächsten Stufe zu erzeugen und diese wieder einzuebnen. Das ist freilich leichter gesagt als getan, weil die zunehmende Größe der Moleküle ihre Handhabung erheblich erschwert. Die Substanzen sind in organischen Lösungsmitteln kaum mehr löslich, was das Abtrennen von unerwünschten Nebenprodukten und die Charakterisierung des Reaktionsprodukts zum Problem macht. Dennoch ist es uns mit einer Reihe chemischer Tricks gelungen, mit dem Verfahren Moleküle mit Graphenstruktur herzustellen, die weit mehr als zehn Nanometer messen und damit nur noch etwa 100-mal kleiner sind als von Graphit abgepellte Proben.



KLAUS MÜLLEN; ABDRUCK MIT FRDL. GEN. VON WILEY VCH

Mit geeigneten chemischen Randgruppen versehen, stapeln sich PAKs zu Säulen, die sich stehend oder liegend auf einer Unterlage anordnen können. Solche Säulen eignen sich möglicherweise als Ladungstransportkanäle in elektronischen Bauteilen.

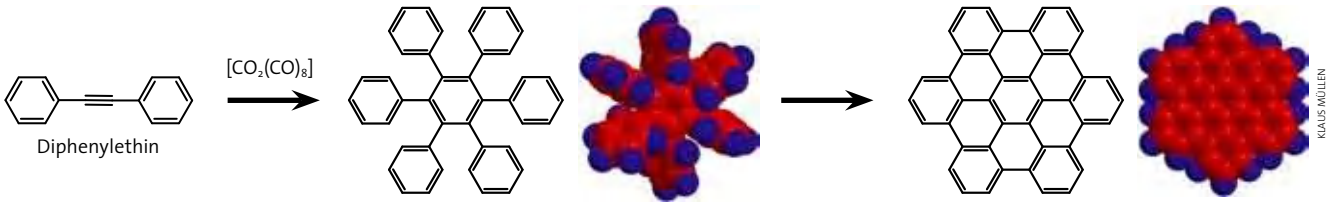
Synthesechemie an Oberflächen

Natürlich wäre es schön, noch größere Ausdehnungen zu erreichen. Aber im Hinblick auf technische Anwendungen ist das gar nicht unbedingt sinnvoll! Als Werkstoff für die Elektronik hat Graphen nämlich auch einen Nachteil: Zwar können sich die Elektronen darin extrem schnell bewegen, doch ist das Material kein Halbleiter, sondern ein Halbmetall. Das bedeutet, dass nur eine kleine Energiedifferenz zwischen besetzten und unbesetzten Elektronenniveaus besteht, die sich leicht überwinden lässt. Deshalb würde sich ein daraus gefertigtes elektronisches Schaltelement nie auf »aus« stellen lassen, sondern immer eingeschaltet bleiben. Theoretischen Berechnungen zufolge sollte die Energielücke aber größer sein, wenn Graphen in Form schmaler Streifen vorliegt. Aus diesem Grund haben Physiker Kohlenstoffnanoröhren, die sich auf verschiedenen Wegen relativ leicht herstellen lassen, mit energiereicher Strahlung aufgeschnitten und dadurch streifenförmige Moleküle erhalten. Allerdings sind deren Ränder nicht einheitlich – Grund genug, sich auch hier eine chemische Syntheseroute zu überlegen.

Nur taucht dabei ein anderes Problem auf: Die Streifen tendieren schon während ihrer Entstehung dazu, sich übereinanderzutürmen. Dann sind sie – ebenso wie größere Graphenmoleküle – aber nicht mehr in den gängigen Lösungsmitteln löslich, so dass es schwer ist, sie nach ihrer Herstellung in Form dünner Filme auf Oberflächen abzuscheiden. Solche dünnen Schichten aber braucht es für eine Elektronik mit organischen Materialien. Mit elektrischen Kontakten versehen, können sie etwa als Dioden fungieren, die den Durchtritt von Ladungen steuern oder Licht abstrahlen. Sie aus einer Lösung abzuscheiden, hat große Vorteile: Es ist sehr viel einfacher und preiswerter, als sie etwa im Hochvakuum aufzudampfen. Zudem bietet es die Chance, Schaltungen mit den gleichen einfachen »Druckverfahren« herzustellen, wie sie bei heutigen Platinen üblich sind.

Das Problem ist also, dass es zwar gelingt, Graphenscheiben und -nanostreifen in erstaunlicher Perfektion und Größe zu synthetisieren, nicht aber, sie anschließend zu ultradünnen Filmen zu verarbeiten. Wie lässt sich diese Schwierigkeit überwinden? Eine Möglichkeit wäre, nach geeigneten Lösungsmitteln zu suchen oder Zusätze zu finden, die das Lösen erleichtern. Ein eleganterer Ausweg besteht jedoch darin, die Synthese unmittelbar auf einer Oberfläche durchzuführen; denn dort sollen die Makromoleküle am Ende ja auch ihre Funktion ausüben.

Ein solches Verfahren haben wir gemeinsam mit der Arbeitsgruppe von Roman Fasel an der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA) in Dübendorf (Schweiz) entwickelt. Es besteht darin, zunächst kleine, gas-



Die gezielte Herstellung von genau definierten Ausschnitten aus dem Graphen lässt sich durch die Synthese von »Superbenzol« veranschaulichen. Als Ausgangssubstanz dient Diphenylethin. Darin hängt an zwei Kohlenstoffatomen, die über eine Dreifachbindung miteinander verknüpft sind, jeweils ein Benzolring. Drei solche Moleküle lassen sich mit Hilfe eines Kobaltkatalysators zum Hexaphenylbenzol verbinden. Das ist ein Benzolring, der an jeder seiner sechs Ecken einen weiteren solchen Ring trägt. Diese äußeren Ringe behindern sich räumlich und stehen deshalb schräg zueinander wie bei einem Propeller. Man kann sie jedoch mit einem Oxidationsmittel wie Eisen(III)-chlorid »platt schlagen«. Dabei verlieren sie vier ihrer fünf Wasserstoffatome und verbinden sich direkt miteinander. Zugleich entstehen zwischen ihnen insgesamt sechs neue Sechsecke.

förmige Benzolmoleküle auf einer kalten Metalloberfläche zu kondensieren. Wir halten ihre Menge absichtlich so gering, dass sie nur eine einlagige Schicht bilden und sich nicht übereinanderstapeln. Außerdem befinden sich in den Benzolbausteinen an bestimmten Stellen Halogenatome wie Brom oder Jod statt des sonst üblichen Wasserstoffs.

Die Kohlenstoff-Halogen-Bindungen brechen auf, sobald die Substanzen die Metalloberfläche berühren. Die resultierenden hochreaktiven Zwischenprodukte diffundieren auf der Unterlage umher und verbinden sich beim Aufeinandertreffen, wobei ausgedehnte Polymere entstehen. Wie beim Hexaphenylbenzol sind die meisten Ringe darin zunächst noch gekippt. Im abschließenden Schritt werden sie mit dem oben geschilderten Verfahren platt geschlagen. Den besten Beweis, dass dieses Reaktionsschema wie gewünscht und absolut präzise abläuft, liefert die Abbildung des erhaltenen Produkts mit einem Rastertunnelmikroskop: Entsprechende Aufnahmen zeigen die ausgedehnten graphenartigen Strukturen mit atomarer Auflösung.

Präzises Molekülwachstum

Über die Art der abgeschiedenen Moleküle konnten wir die Form und somit auch die Elektronenstruktur der Graphenstreifen gezielt variieren. Eine wichtige Rolle spielte dabei, an welchen Stellen im Ausgangsmolekül die Halogenatome saßen, da sie die Verknüpfungspunkte zwischen den PAKs bei der Polymerisation festlegen. Auf diese Weise konnten wir zum Beispiel gestreckte oder zickzackförmige Graphennanostreifen herstellen (Bilder rechts). Ausgehend von einem Gemisch aus Molekülen mit zwei oder drei Bindungsstellen ließen sich sogar y-förmige Polymere erzeugen, die somit an drei Enden mit Elektroden versehen werden können – Vorbedingung für ihren Einsatz als Transistoren, bei denen eine am Gate (Gatter) anliegende Spannung den Stromfluss zwischen Source (Quelle) und Drain (Abfluss) steuert.

Der Fantasie der Materialchemiker sind an dieser Stelle kaum Grenzen gesetzt. Wenn man in den kleinen Vorläufermolekülen zwei Verknüpfungsstellen vorsieht, dann entstehen bei der Reaktion schmale Graphenstreifen. Drei oder gar sechs Verknüpfungsstellen erlauben dagegen das zweidimensionale Wachstum innerhalb der Ebene, so dass wabenförmige Netzwerke entstehen. Auch deren Struktur lässt sich gezielt beeinflussen. So haben wir kranzförmige Vorläufermoleküle mit einem Loch in der Mitte synthetisiert, bei deren zweidimensionaler Verknüpfung eine monomolekulare Schicht mit regelmäßig angeordneten Poren entstand (Bild S. 88). Auf diese Weise erhielten wir neuartige Membranen mit absolut einheitlicher Porengröße. Ein solches Material kann gasförmige Atome oder Moleküle selbst dann noch trennen, wenn sie fast gleich groß sind.

Generell liefert unser Verfahren die gewünschten Makromoleküle in einer Präzision, wie sie die klassische Polymersynthese nicht annähernd bieten kann. Zwar lassen sich damit keine größeren Mengen herstellen. Doch darauf kommt es auch gar nicht an. Im Gegenteil: Wenn mit einer einzelnen Schicht von Graphenmolekülen – also einer unwägbar kleinen Menge – die erwünschte elektronische Funktion erzielbar ist, dann spricht das für höchste Sparsamkeit beim Materialverbrauch.

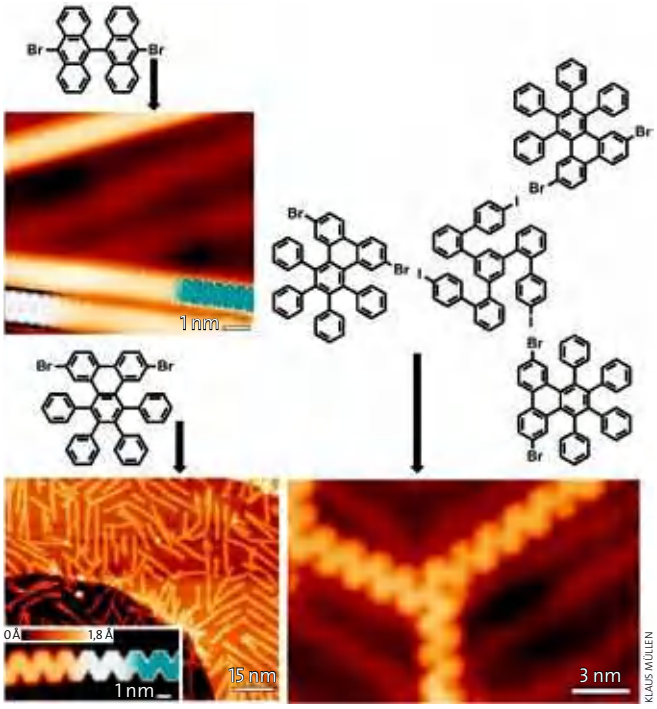
Die maßgeschneiderte Herstellung riesiger Makromoleküle mit genau definierter Größe, Zusammensetzung und Form verheißt nicht weniger als einen Paradigmenwechsel in der Polymersynthese. Bisher ist noch gar nicht absehbar, wohin er führen wird. Ganz sicher lässt sich unser Ansatz aber auch noch auf ganz andere Materialien als Kohlenstoffwabengitter anwenden.

Erst einmal bleiben bei den graphenartigen Strukturen selbst allerdings Fragen zu beantworten. Wie lang können die Streifen gemacht werden? Gelingt es, breitere Bänder daraus herzustellen, indem man sie kontrolliert seitlich zusammenwachsen lässt? Und ist es möglich, gezielt Kohlenstoff- durch Stickstoff- oder Boratome zu ersetzen, um auf diese Weise eine Dotierung wie bei anorganischen Halbleitern zu erreichen?

Vor allem aber bleibt ein Punkt zu klären: Gelingen solche Synthesen auch auf Isolatoroberflächen? Nur dann ließen sich die Produkte nämlich unmittelbar in elektronischen Bauelementen einsetzen. Für unsere Versuche haben wir Me-

tallflächen verwendet, weil das Metall als Katalysator für den ersten Reaktionsschritt – das Entfernen der Halogenatome – eine wichtige Rolle spielt. Die metallische Unterlage erlaubte zudem, die gebildeten Graphenschichten im Rastertunnelmikroskop zu betrachten; mit einer Isolatoroberfläche wäre das nicht möglich. Doch Dioden oder Transistoren funktionieren nur mit nichtleitender Unterlage. Man müsste die Graphenschichten also dorthin übertragen – sicherlich ein diffiziler Vorgang – oder sie am besten direkt darauf erzeugen.

Wenn das gelingt, haben Graphenmoleküle das Potenzial, in einer zukünftigen Elektronik auf Kohlenstoffbasis das Silizium als Halbleitermaterial zu ersetzen. Mehr noch: Durch die mögliche Wechselwirkung mit Licht bahnen sie zugleich den Weg für die schon länger anvisierte Optoelektronik. Hierbei übernehmen Photonen ganz oder teilweise die Aufgabe der Elektronen, was eine weitere enorme Steigerung der Arbeitsgeschwindigkeit mit sich brächte. Grundsätzlich ist es möglich, dem Graphengitter nachgebildete organische Halbleiter für die jeweiligen optischen und elektronischen Funktionen maßgeschneidert herzustellen und zu den notwendigen dünnen Filmen zu verarbeiten. Mit etwas Geschick lässt sich wohl zugleich erreichen, dass die Moleküle spontan Packungsformen annehmen, die für die anvisierte Aufgabe besonders günstig sind.



Halogenatome wie Brom oder Jod ermöglichen die kontrollierte Verknüpfung von PAKs zu Polymeren einer bestimmten Geometrie. Sie werden bei der Anlagerung an eine Metalloberfläche abgespalten, so dass hochreaktive Zwischenprodukte entstehen, die auf der Unterlage umherwandern. Beim Aufeinandertreffen verbinden sie sich an den Stellen, an denen ursprünglich ein Halogenatom saß, zu Propellermolekülen, die sich durch Dehydrierung einebnen lassen. Hier ist gezeigt, wie es durch die Wahl der Ausgangssubstanz und der Position des Halogenatoms gelingt, lineare oder zickzackförmige Bänder zu erzeugen. Sogar y-förmige Polymere sind herstellbar.

Allerdings ist – das sei nicht verschwiegen – die von uns erreichte hohe Präzision aufwändig und entsprechend teuer. Indes erfordert eine Vielzahl von wichtigen Materialfunktionen gar keine derart perfekten Strukturen. Deshalb erschien es uns sinnvoll, auch auf einfachere Verfahren wie die Pyrolyse – also die Zersetzung bei hohen Temperaturen unter Ausschluss von Sauerstoff – oder die Abscheidung von Kohlenstoff aus der Gasphase zurückzugreifen, die wegen der drastischeren Bedingungen unkontrollierter ablaufen. Dabei orientierten wir uns wiederum an den Erfordernissen der organischen Elektronik. So benötigt eine Solarzelle oder eine Leuchtdiode jeweils eine Elektrode, die elektrisch leitfähig und zugleich lichtdurchlässig ist. Als Material dafür dienen heute meist anorganische Oxide wie Indiumzinnoxid. Daraus gefertigte Elektroden haben jedoch beträchtliche Nachteile: Ihre Oberfläche ist sehr rau, und sie sind chemisch nur begrenzt stabil sowie derart spröde, dass sich keine elektronischen Bauelemente auf einem biegsamen Untergrund daraus fabrizieren lassen. Abgesehen davon, reichen die weltweiten Vorräte an Indium nicht aus, den wachsenden Bedarf zu decken.

Schon vor vier Jahren haben wir deshalb über zwei Verfahren berichtet, mit denen wir Graphenschichten herstellen konnten, die optische Transparenz mit elektrischer Leitfähigkeit verbinden und sich als Fensterelektroden für Solarzellen eignen. In einem Fall verschweißten wir PAKs einfach bei hohen Temperaturen zu Graphenschichten. Die Dehydrierung läuft dabei sehr viel gewaltsamer ab als bei dem oben geschilderten anspruchsvolleren Verfahren, was unregelmäßigere Strukturen ergibt. Deren Qualität reicht jedoch für den genannten Zweck.

Im anderen Fall griffen wir auf das schon von Geim angewandte Abpellen einzelner Graphenschichten von Graphit zurück. Als Chemiker machten wir das jedoch nicht einfach mechanisch mit Tesafilm. Vielmehr bedienten wir uns schon lange bekannter Methoden, um den Abstand zwischen den Schichten im Graphit zu vergrößern, so dass sie sich leichter ablösen lassen. Zum Aufweiten ist etwa das Einlagern von Metallen in die Zwischenräume geeignet.

Auch durch Zugabe starker Oxidationsmittel gelingt es, die Kohlenstoffschichten im Graphit voneinander zu trennen. Dieser verwandelt sich dabei in Graphenoxid – ein gelbes Material, das dank sauerstoffhaltiger chemischer Gruppen gut löslich und somit problemlos als Film abscheidbar ist. Allerdings fehlen ihm die meisten der vorteilhaften Eigenschaften von Graphen. Deshalb muss man nach der Abscheidung wieder möglichst viel von dem Sauerstoff aus dem Film entfernen und das Graphenoxid so in das ursprüngliche Graphen zurückverwandeln. Leider gelingt das nicht perfekt, so dass wir einen Kompromiss zwischen Einfachheit des Verfahrens und erwünschter Funktion eingehen mussten. Immerhin konnten wir auf diese Weise ebenfalls

funktionsfähige Graphen-Fensterelektroden für Solarzellen gewinnen.

Wir haben verschiedene Möglichkeiten erforscht, mit chemischen, elektrochemischen und thermischen Verfahren die Rückumwandlung von Graphenoxid in Graphen zu optimieren. Als besonders günstig erwies sich eine abschließende Hochtemperaturbehandlung mit kohlenstoffhaltigen gasförmigen Verbindungen wie Ethin (HC≡CH). Diese reparieren die Löcher, die im Graphen entstehen, wenn sich beim Entfernen des Sauerstoffs kleine Kohlenstoffreste mit ablösen.

Elektrische Energie effizienter speichern

Dieses Verfahren eröffnete auch völlig neue, überraschende Anwendungen für die Kohlenstofffolie. So lässt sich damit die Lithiumionenbatterie verbessern, die heutige Standardenergiequelle vieler mobiler Elektronikgeräte wie Handys, Digitalkameras und Notebooks. Als Anodenmaterial enthält sie üblicherweise Graphit, der beim Laden Lithiumionen einlagert. Seine Ladungsspeicherkapazität ist aber ziemlich begrenzt, weil es nur eine begrenzte Menge an Lithium aufnehmen kann. Deshalb suchen die Hersteller schon seit Langem intensiv nach Alternativen. Metalloxide zum Beispiel können deutlich mehr Ladung speichern. Allerdings bleiben sie während der Ein- und Auslagerung der Lithiumionen mechanisch nicht stabil und zerbröseln mit der Zeit. Um das zu verhindern, haben wir die Metalloxidteilchen in eine Graphenhülle eingepackt. Tatsächlich erhielten wir auf diese Weise eine Batterie mit hoher Ladungspeicherkapazität, deren Anode ihre kompakte Form beibehielt und deren Leistung über viele Lade-Entlade-Zyklen hinweg konstant hoch blieb.

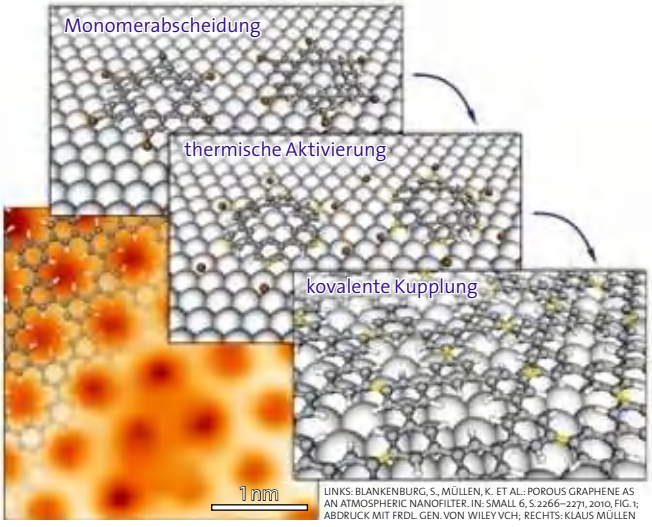
Allerdings mussten wir auf einen Trick zurückgreifen, damit das Einwickeln funktionierte. Metalloxide tragen ebenso wie Graphenoxid auf ihrer Oberfläche negative Ladungen. Beide stoßen einander deshalb ab. Folglich galt es, die Ladung auf den Metalloxidteilchen zunächst umzukehren. Das gelang durch Zugabe einer Substanz, die sich an die Partikel band und dabei eine neue, positiv geladene Oberfläche erzeugte. Anschließend fügten wir das Graphenoxid hinzu. Dieses umhüllte die Teilchen dann ganz von selbst, weil sich beide wegen ihrer entgegensetzten Ladung anzogen. Am Schluss verwandelten wir das Graphenoxid durch thermische Behandlung oder durch chemische Reduktion in Graphen zurück. Das Ergebnis war ein Hybridmaterial aus einem anorganischen Oxid mit einer stabilisierenden, aber nicht völlig geschlossenen organischen Hülle.

Neue Katalysatoren für Brennstoffzellen

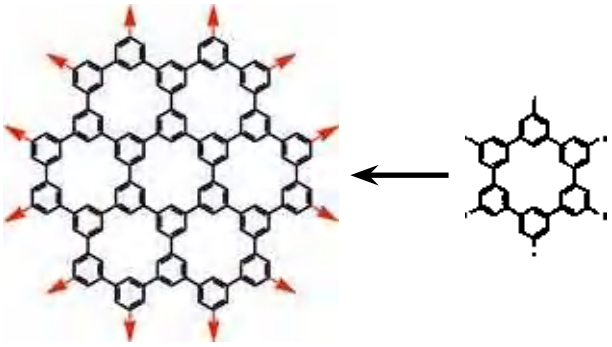
Es gibt weitere Beispiele für den Einsatz chemisch erzeugter Graphenfolien zur Speicherung oder Gewinnung von Energie. Als viel versprechender Energieträger der Zukunft gilt heute allgemein der Wasserstoff. Bei der berühmt-berüchtigten Knallgasexplosion verbindet er sich mit Sauerstoff unter Abgabe von Energie zu Wasser. In einer Brennstoffzelle läuft diese Reaktion in kontrollierter Form ab: Sie wandelt mit sehr hohem Wirkungsgrad chemische in elektrische Energie um. Deshalb sind Brennstoffzellen aussichtsreiche Kandidaten als Stromlieferanten für künftige Elektroautos.

Zum Zünden der Knallgasexplosion ist ein Funke nötig. Dessen Aufgabe übernimmt bei der Reaktion in der Brennstoffzelle ein Katalysator. Heutzutage besteht er in der Regel aus Edelmetallverbindungen mit Aktivkohle als Trägermaterial. Doch Edelmetalle sind teuer: Wenn nicht jedes Auto zusätzlich einige Gramm kostbares Platin enthalten soll, empfiehlt sich die Suche nach einem preiswerteren Ersatz.

An dieser Stelle kam uns eine theoretische Voraussage zu Hilfe. Danach können auch Graphene als Katalysatoren wirken, wenn in ihrem Gitter einzelne Kohlenstoff- durch Stickstoffatome ersetzt sind. Solche dotierten Graphene lassen sich mit unserem oben geschilderten Verfahren synthetisieren. Allerdings kämen sie dann womöglich noch teurer als Platin. Deshalb haben wir auf eine grobschlächtigere, aber preiswertere Methode zurückgegriffen: die thermische Zersetzung von kohlenstoff- und stickstoffhaltigen Vorläufermolekülen, zum Beispiel bestimmten Farbpigmenten, bei



LINKS: BLANKENBURG, S., MÜLLEN, K. ET AL.: POROUS GRAPHENE AS AN ATMOSPHERIC NANOFILTER. IN: SMALL 6, S.2266–2271, 2010, FIG.1; ABDRUCK MIT FRDL. GEN. VON WILEY VCH; RECHTS: KLAUS MÜLLEN



Mit »löchrigen« Vorläufern lassen sich auch Membranen mit exakt definierten Porengrößen anfertigen. Sie können dazu dienen, Stoffe anhand der Molekülgröße hochselektiv zu trennen.

LIU, R., MÜLLEN, K. ET AL.: NITROGEN-DOPED ORDERED MESOPOROUS GRAPHITIC ARRAYS WITH HIGH ELECTROCATALYTIC ACTIVITY FOR OXYGEN REDUCTION. IN: ANGEWANDTE CHEMIE INT. ED. 49, S. 2565–2569, 2010, FIG. 1; ABDRUCK MIT FREUNDLICHER GEN. VON WILEY-VCH

Bei der thermischen Zersetzung (Pyrolyse) stickstoffhaltiger PAKs in den röhrenförmigen Hohlräumen einer Form aus Siliziumdioxid (SiO_2) entstehen Graphene mit winzigen Poren. Diese können nach dem Wegätzen des Trägermaterials an Stelle von teurem Platin als Katalysatoren für Brennstoffzellen dienen, deren Kathodenreaktion hier gezeigt ist.

etwa 800 Grad Celsius. Diese Pyrolyse sorgt zugleich für viele Poren, was sich günstig auf die katalytische Aktivität auswirkt; denn dadurch steht eine große innere Oberfläche zur Verfügung, an der Sauerstoff Elektronen aufnehmen kann (Bild oben).

Es gibt also eine Fülle von Verfahren zur Herstellung von Graphen, die sich in ihrem chemischen und verarbeitungstechnischen Aufwand unterscheiden. Welches jeweils in Frage kommt, hängt von der angestrebten Funktion ab – sowie im Fall einer technischen Umsetzung und kommerziellen Verwertung natürlich auch von den Kosten und den Erfordernissen des Marktes. Dabei umfasst der hier gegebene Überblick über unsere eigenen Arbeiten noch längst nicht alle Verfahren zur Erzeugung des begehrten Materials. Beispielsweise lassen sich dünne Graphenschichten auch durch chemische Dampfabscheidung (chemical vapor deposition, kurz CVD) herstellen.

Dabei werden kleine kohlenstoffhaltige Moleküle wie Methan oder Ethin bei sehr hoher Temperatur in energiereiche Bausteine mit zwei Kohlenstoffatomen umgewandelt, die dann auf einer geeigneten Oberfläche kondensieren und sich miteinander verbinden. Wie perfekt die Graphenschicht ist, hängt auch hier stark von Details des Verfahrens ab. Außerdem gelingt die Abscheidung bisher – wie bei unserer Synthese – nur auf Metalloberflächen, was die anschließende Übertragung auf ein Isolatormaterial erfordert. Dabei können zusätzliche Strukturdefekte auftreten, welche die Qualität des Materials vermindern.

Auch beim Graphen zeigt sich also, wie weit und mühsam der Weg von der Erzeugung und Verarbeitung eines Werkstoffs zu einer robusten Herstellungsmethode für ein daraus gefertigtes Produkt ist. Aber jede Technologie, die uns heute selbstverständlich vorkommt, war irgendwann einmal eine verrückte Idee, ein Experiment der Grundlagenforschung oder eine theoretische Berechnung. Unsere Gesellschaft steht vor großen Herausforderungen auf dem Gebiet der Energieerzeugung – mit Auswirkungen auf viele andere Lebensbereiche. Sie zu meistern, gelingt nur mit intelligenten Materialien. Die kann man aber nicht im Versandkatalog bestellen – jemand muss sie ersinnen und realisieren. Da wir nun einmal in einer Welt leben, die ihren Wohlstand immer raffinierteren Materialien verdankt, brauchen wir auch für die Zukunft die richtigen Werkstoffe: Graphene dürften dabei eine herausragende Rolle spielen.

DER AUTOR

Klaus Müllen studierte in Köln Chemie und promovierte an der Universität Basel in der Schweiz. Nach seiner Habilitation an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich hatte er Professuren in Köln und Mainz inne. Seit 1989 ist er Direktor des Max-Planck-Instituts für Polymerforschung in Mainz.

QUELLEN

Cai, J. M. et al.: Atomically Precise Bottom-up Fabrication of Graphene Nanoribbons. In: Nature 466, S. 470–473, 2010
Feng, X. L. et al.: Towards High Charge-Carrier Mobilities by Rational Design of the Shape and Periphery of Discotics. In: Nature Materials 8, S. 421–426, 2009
Treier, M. et al.: Surface-Assisted Cyclodehydrogenation Provides a Synthetic Route towards Easily Processable and Chemically Tailored Nanographenes. In: Nature Chemistry 3, S. 61–67, 2011
Yang, S. B. et al.: Fabrication of Graphene-Encapsulated Oxide Nanoparticles: Towards High-Performance Anode Materials for Lithium Storage. In: Angewandte Chemie 47, S. 8586–8589, 2010

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1155301**

Vom Graphen zum Silicen

Schon 1993 sagten es quantenmechanische Berechnungen voraus: Wie Kohlenstoff sollte auch das chemisch verwandte Silizium eine atomdicke Folie aus Sechsringen bilden. Dieses Silicen wäre für die Hochleistungselektronik vermutlich sogar noch geeigneter als Graphen. Doch jetzt erst gelang es Physikern, den Stoff im Labor herzustellen.

VON LARS FISCHER

Graphen, die Modifikation des Kohlenstoffs mit der zweidimensionalen Molekülstruktur, gilt inzwischen weithin als Wundermaterial. Dank seiner Zugfestigkeit und hohen Leitfähigkeit für Strom und Wärme könnte es eine Revolution in der Materialwissenschaft auslösen und insbesondere eine neue Ära in der Elektronik einläuten (siehe voranstehenden Beitrag). Einige Forscher allerdings vermuten, dass das wabenförmige Gitter aus Kohlenstoffatomen nur der erste Vertreter einer ganz neuen Klasse von Molekülen ist. So könnte quantenmechanischen Berechnungen zufolge auch Silizium, das im Periodensystem der Elemente direkt unter dem Kohlenstoff steht und sich chemisch sehr ähnlich verhält, das begehrte Sechseckgitter bilden. Gian G. Guzmán-Verri, Physiker an der Wright State University in Dayton (Ohio) und einer der Pioniere bei der Erforschung des aussichtsreichen Materials, taufte es 2007 auf den Namen Silicen.

Graphen hat ein großes Handikap: So verlockend seine besonderen Talente sind, so schwer ist es in bestehende Technologien zu integrieren. Das trifft vor allem auf die moderne Chipproduktion zu, wo die am leichtesten erreichbaren Anwendungen warten. Nach Einschätzung von Experten nimmt die Entwicklung graphenbasierter Schaltkreise selbst im günstigsten Fall noch zwei Jahrzehnte in Anspruch. Silicen dagegen ließe sich, so die Hoffnung, mit der bestehenden Technik in Mikrochips einbauen. Dabei hätte es gemäß den Berechnungen ähnlich günstige Eigenschaften wie das Kohlenstoffgitter und wäre für elektronische Bauteile daher mindestens ebenso geeignet.

Derlei Spekulationen haben nun eine solide Basis erhalten: Wissenschaftlern um Patrick Vogt von der Technischen Universität Berlin, Paola De Padova vom Istituto di Struttura della Materia in Rom sowie Guy Le Lay von der Université d'Aix-Marseille ist es gelungen, die zweidimensionale Siliziumfolie im Labor herzustellen. Noch ungleich aufwändiger war es freilich, ihre Identität auch zweifelsfrei nachzuweisen. Schon im Frühjahr 2010 habe es die ersten Indizien für die erfolgreiche Synthese gegeben, erklärt Vogt. »Um aber einen klaren Nachweis dafür zu führen, dass es sich bei diesen Schichten tatsächlich um Silicen handelte, benötigten wir weitere umfangreiche Untersuchungen.«

Silicen: In der Natur unbekannt

Das neue zweidimensionale Material hat es den Forschern nicht leicht gemacht. Lange war sogar völlig unklar, ob es Silicen überhaupt geben kann, und wenn ja, ob die Verbindung tatsächlich dem Graphen ähnelt. So existiert beim Silizium kein Gegenstück zum Graphit, der aus Graphenschichten aufgebaut ist und unter Normalbedingungen die stabile Form des Kohlenstoffs darstellt, während Diamant, die tetraedrische Form, metastabil ist. Bei Silizium existiert dagegen in der Natur ausschließlich die tetraedrische Version.

Anders als Kohlenstoff bildet dieses Element auch nicht so einfach graphenähnliche Schichtstrukturen. Letztendlich liegt das an der elektronischen Struktur der Siliziumatome. Bei Kohlenstoff ist die Energiedifferenz zwischen den vier Orbitalen der äußersten Elektronenschale ungewöhnlich hoch. Dadurch wird unter gewissen Bedingungen nur ein Teil von ihnen für normale Bindungen genutzt, bei denen sich die Elektronen auf der Verbindungslinie zwischen den beteiligten Atomen konzentrieren. Die übrigen Orbitale stehen, indem sie sich seitlich überlappen, für Mehrfachbindungen zur Verfügung, die eine Besonderheit des Kohlenstoffs sind – und für die beweglichen Elektronen des Graphens.

Beim Silizium dagegen ist die Differenz zwischen den vier Orbitalen nur halb so groß. Deswegen gehen sie fast immer alle eine normale Einfachbindung ein. Die Bindungspartner ordnen sich dann um das Atom herum an wie die Spitzen eines Tetraeders. Für eventuelle Doppelbindungen oder gar frei umherschwirrende Elektronen bleibt kein unbeteiligtes Orbital mehr übrig.

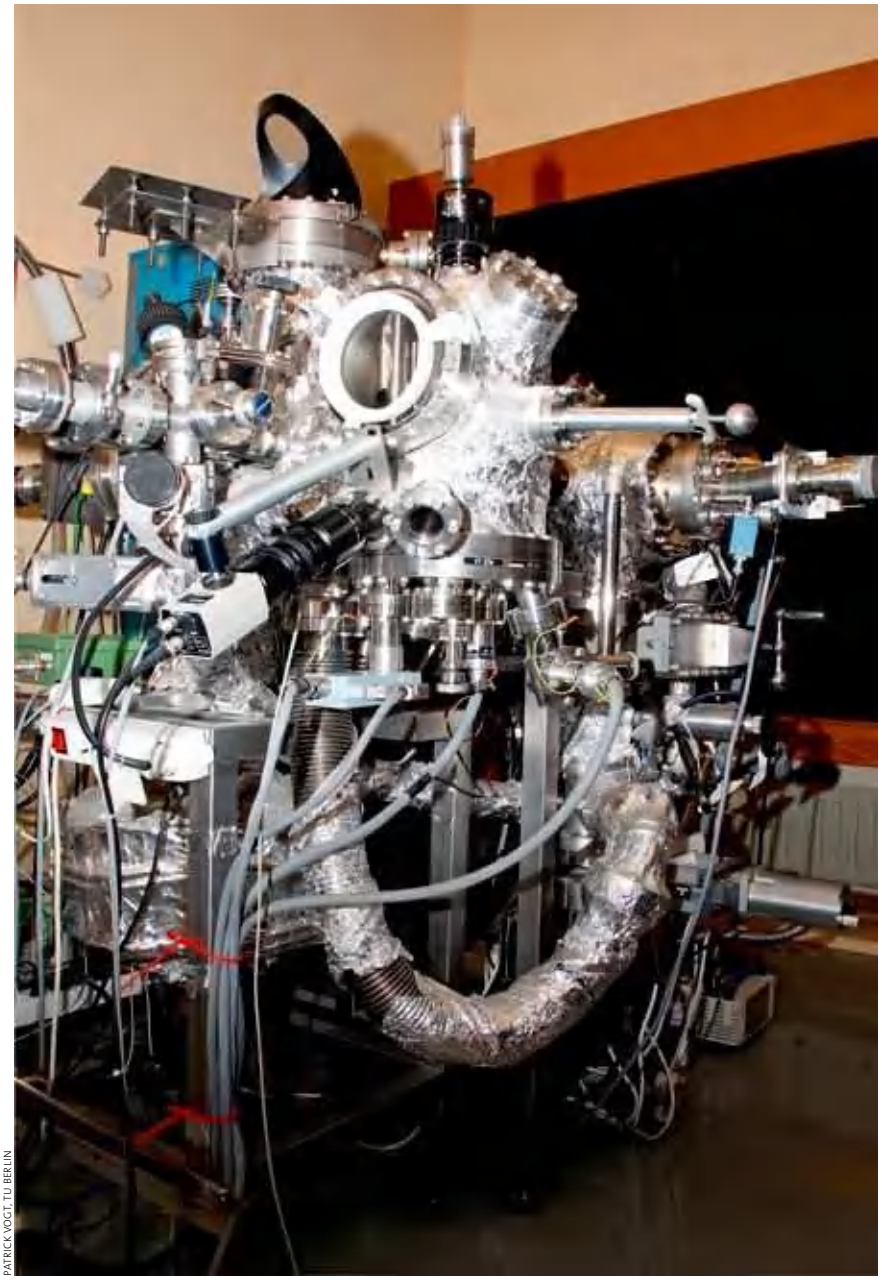
Außerdem sind Siliziumatome deutlich größer. Die für die Stärke der Bindung entscheidende Überlappung der Orbitale fällt dadurch weitaus schwächer aus als beim Kohlenstoff, weshalb der Zusammenhalt zwischen zwei Siliziumatomen deutlich geringer ist. An diesen beiden Effekten liegt es, dass die Chemie des Siliziums nicht annähernd so vielseitig ist wie die des Kohlenstoffs und dass Silicen im Gegensatz zu Graphen in der Natur nicht vorkommt.

Umstrittene Nanofolie

Aus der Traum also? Keineswegs. Schon 1994 berechneten japanische Chemiker, dass ein zu Graphen analoges Blatt aus Siliziumatomen wahrscheinlich leicht gewellt, aber immerhin stabil wäre. Dieses Ergebnis bestätigten Guzmán-Verri und sein Team mit modernen Methoden im Jahr 2007. Bald da-

rauf gelang den Forschern der nächste Schritt: Auf der Oberfläche eines Silberkristalls erzeugten sie 1,6 Nanometer breite Bänder aus einer einzelnen Lage von Siliziumatomen, angeordnet in Sechsringen.

Diese ermutigenden Ergebnisse blieben allerdings nicht unwidersprochen. Die ukrainische Physikerin Elena F. Sheka stellte 2009 im Online-Repositorium Arxiv.org die Behauptung auf, Silicen im engeren Sinn könne es nicht geben: Eine hexagonale Anordnung von Siliziumatomen allein mache noch kein echtes Gegenstück zum Graphen. Silicen sensu stricto sei grundsätzlich nicht herstellbar. Das erkenne man schon daran, dass das Silizium keines der zahlreichen kleineren Moleküle mit analogen Bindungsverhältnissen bildet, die vom Kohlenstoff bekannt sind. Tatsächlich existieren keine Siliziumpendants zu Ethylen (UPAC: Ethen) und Benzol (Benzen), den einfachsten Molekülen mit der für Graphen typischen dreieckig-planaren Bindungsgeometrie.



PATRICK VOGT, TU BERLIN

In dieser Anlage am Centre Interdisciplinaire de Nanoscience de Marseille erzeugten Wissenschaftler um Patrick Vogt von der Technischen Universität Berlin durch kontrolliertes Aufdampfen monoatomare Schichten aus Silizium auf einer Silberoberfläche und vermaßen sie mit einem integrierten Rastertunnelmikroskop.

Indes gibt es auch gute Argumente, weshalb die von Guzmán-Verri hergestellten Bänder aus Siliziumwaben tatsächlich äquivalent zu Graphen sind. So fanden die Forscher bei ihren Messungen Hinweise auf so genannte Dirac-Kegel. Diese charakteristische elektronische Eigenschaft zweidimensionaler Materialien ist auch vom Graphen bekannt. Außerdem zeigte sich, dass das Silizium der Bänder sich chemisch völlig anders verhielt, als zu erwarten wäre, wenn die Atome sich bloß auf der Oberfläche angelagert hätten.

Allerdings sind die Nanobänder keineswegs eben wie eine Graphenfläche – einige Siliziumatome ragen empor, während andere in Lücken der Substratstruktur darunter eingebettet sind. Die direkten Nachbarn eines Atoms bilden daher auch nicht wie im Graphen ein Dreieck, sondern ein Tetraeder, und deshalb könne man, kritisiert Sheka, keinesfalls von Silicen sprechen. Das lässt Vogt jedoch nicht gelten: Entscheidend seien weniger die genauen Bindungsverhältnisse als vielmehr die für die Anwendungen relevanten elektronischen Eigenschaften.

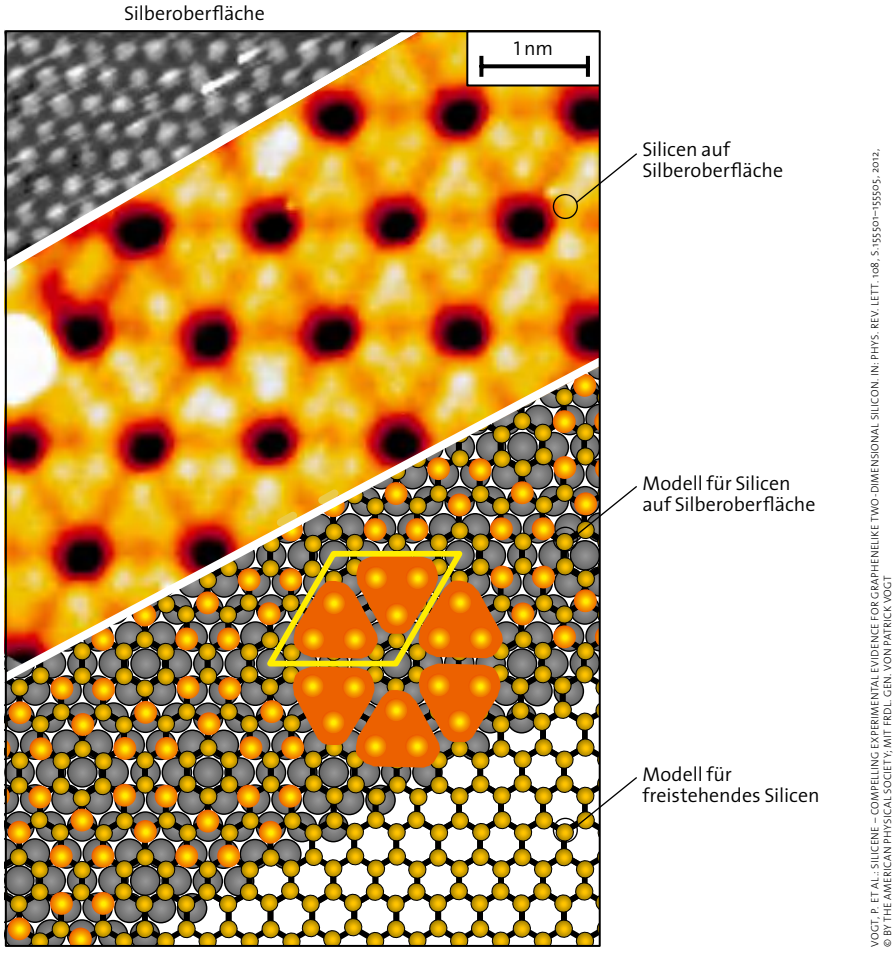
Trügerische Erfolgsmeldung

Letztendlich klären würde die Frage nur das Objekt der Begierde selbst, das sich den Syntheseversuchen bis dahin entzogen hatte: eine monoatomare Siliziumschicht mit quasi unendlicher Ausdehnung in zwei Dimensionen und der typischen elektronischen Struktur des Graphens. 2010 vermeldete ein Team um den Physiker Boubekeur Lalmi von der Université d'Aix-Marseille tatsächlich den ersehnten Erfolg: Nachdem die französischen Wissenschaftler Silizium unter kontrollierten Bedingungen im Vakuum verdampft und auf einer Silberoberfläche abgeschieden hatten, sahen sie im Rastertunnelmikroskop die charakteristische Wabenstruktur.

Die Suche war damit allerdings nicht beendet; denn Lalmis Forscherkollegen erhoben Einwände: Waben allein mach-

ten noch kein Silicen, und die Bindungslänge in der gefundenen Struktur sei für Silizium deutlich zu kurz. Außerdem hätte das Team um Lalmi schlicht versäumt, zweifelsfrei nachzuweisen, dass es sich überhaupt um eine Siliziumschicht handelt. Vor allem aber sei es nicht gelungen, das Ergebnis zu reproduzieren, bemängeln die Forscher um Vogt und Le Lay.

Stattdessen präsentieren sie ihr eigenes Silicen, das völlig anders aussieht als die Ergebnisse von Lalmi und den Verdacht erhärtet, dass die früheren Befunde nur ein Artefakt der Messmethode waren. Das deutsch-französische Team liefert zu seinen rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen auch umfangreiche Messungen der physikalischen und elektronischen Eigenschaften der Siliziumschicht. Insbesondere konnten die Forscher nachweisen, dass der Film sich nicht etwa willkürlich niederschlägt, sondern an den Kanten der bereits vorhandenen Lage wächst. Das macht deutlich: Die Bindungen zwischen den Siliziumatomen bestimmen den Aufbau der Struktur und nicht etwa die Adsorption an die Silberoberfläche. »Die von uns aufgenommenen Rastertunnelmikroskopbilder zeigen deutlich«, erklärt Vogt, »dass die Anordnung der Siliziumatome zwar durch die Silberoberfläche beeinflusst wird, die hexagonale wabenartige Grundstruktur der zweidimensionalen Siliziumschicht aber erhalten bleibt.«



VOGT, P. ET AL.: SILICENE – COMPELLING EXPERIMENTAL EVIDENCE FOR GRAPHENELIKE TWO-DIMENSIONAL SILICON. IN: PHYS. REV. LETT. 108, S. 155501–155505, 2012. © BY THE AMERICAN PHYSICAL SOCIETY; MIT FRDL. GEN. VON PATRICK VOGT

Den rasterelektronischen Aufnahmen einer reinen und einer mit Silicen bedeckten Silberoberfläche (oben) ist hier ein Modell der beobachteten Struktur gegenübergestellt (unten). Demnach bilden die Siliziumatome ein wabenartiges Sechseckgitter. Die meisten von ihnen befinden sich in Lücken zwischen, einige aber auch mitten auf den Silberatomen. Letztere (orangefarben) ragen aus der Oberfläche heraus und bilden die im Rastertunnelmikroskop gut zu erkennenden Dreiergruppen.

Die nächste Superfolie – schon in den Startlöchern?

Vor allem aber machen die Forscher um Vogt, De Padova und Le Lay im Photoemissionsspektrum der Oberfläche Anzeichen für die typische Bandenstruktur einer graphenanalogen Folie aus – obwohl sich das Material tatsächlich in einigen wesentlichen Punkten vom Gegenstück aus Kohlenstoff unterscheidet: Nur ein Drittel aller Siliziumatome weist die typische dreieckige Symmetrie auf, die anderen gehen tetraedrische Bindungsgeometrien ein oder haben Bindungswinkel zwischen diesen beiden Extremen. Entsprechend ist das Silicen des deutsch-französischen Teams nicht flach, sondern gemäß den Vorhersagen gewellt. Die nach oben versetzten Atome der Schicht bilden im Rastertunnelmikroskop ein charakteristisches Dreiecksmuster, das auch von Computersimulationen bestätigt wird.

Mit dem Erfolg tritt die Erforschung des Silicens in eine neue Phase. »Ein Teil unserer aktuellen Arbeit zielt darauf ab, das Silicen von der Silberoberfläche zu lösen und dadurch unbeeinflusst messen zu können«, erklärt Vogt. Die Forscher erwarten, dass sich die Struktur ohne die Wechselwirkung mit dem Substrat verändert. Ein weiterer Ansatz bestehe darin, Silicen direkt auf anderen, für elektronische Anwendungen interessanten Oberflächen abzuscheiden.

Noch sind viele Fragen offen. Nicht zuletzt ist unklar, ob sich die Folie überhaupt wie Graphen von der Unterlage abheben lässt. Ebenso wenig weiß man, wie sich die wellige Struktur im Detail auf die Eigenschaften auswirkt. Zudem winkt bereits ein völlig neues Gebiet. Schon die Berechnungen von 1994 deuteten darauf hin, dass auch das nächste Element in der Reihe, Germanium, ein stabiles zweidimensionales Gitter bildet. Dieses System wollen Vogt und seine Kollegen als Nächstes synthetisieren.

Lars Fischer hat Chemie studiert und ist Redakteur bei Spektrum.de.

Laurence C. Smith
Die Welt im Jahr 2050
Die Zukunft unserer Zivilisation
Aus dem Englischen
von Martin Pfeiffer und Udo Rennert.
dva, München 2011. 480 S., € 22,99

KLIMAFORSCHUNG

Eine Prognose mit Schlagseite nach Norden

Dieses Zukunftsszenario ist wissenschaftlich fundiert, gut belegt und lebendig erzählt. Nur der Süden kommt dabei zu kurz – wohl wegen der persönlichen Vorlieben des Autors.

Der amerikanische Geowissenschaftler Laurence C. Smith, Professor und stellvertretender Chef des Fachbereichs Geografie an der University of California in Los Angeles, hat sich mit der Frage befasst, wie die Welt im Jahr 2050 aussehen wird oder aussehen könnte. Dabei fragt er nicht nach handelnden Menschen in Politik, Wirtschaft und Gesellschaft, wie es vielleicht ein Sozialwissenschaftler tun würde, sondern – typisch für einen Naturwissenschaftler – nach den Kräften, die unabhängig von den Entscheidungen Einzelner die menschliche Entwicklung bestimmen.

Vier globale Kräfte sind seiner Meinung nach entscheidend: die Bevölkerungsentwicklung, der Verbrauch natürlicher Ressourcen, die Globalisierung und der Klimawandel. Hinzu kommt als fünfte Kraft der technische Fortschritt, der auf die vier genannten einwirkt. Die Begründung für seine Wahl zieht Smith aus der Geschichte: Die Kräfte, die in der Vergangenheit gewirkt haben, würden auch in Zukunft weiter dominieren.

Auf dieser Basis erzählt er, vielfach gestützt auf wissenschaftliche Modelle, die Geschichte der Zukunft in lebendigen Bildern. Viele der Themen sind uns vertraut, etwa die Herausforderungen der Energieversorgung der nächsten Jahrzehnte, das starke Bevölkerungswachstum vor allem in Afrika, die Verstädterung der Welt, die Folgen des Klimawandels, die Entwicklung der Wasserressourcen und vieles mehr. Neuigkeitswert haben für mitteleuropäische Leser eher Themen, die den Norden betreffen. Wird die Nordwestpassage, der Seeweg durch die kanadische Arktis, in den nächsten Jahrzehnten im Wesentlichen eisfrei sein? Wem gehört der Nordpol? Was geschieht mit Gebäuden und Straßen, wenn der Permafrost in hohen Breitengraden auftaut, und wie wird sich die dortige indigene Bevölkerung entwickeln?

Das zentrale Ergebnis des Buchs: Der Norden hat eine glänzende Zukunft. Begünstigt durch den Klimawandel werden vor allem Kanada, die USA und Skandinavien profitieren. Diese Länder, so Smith, sind wirtschaftsfreundlich, globalisierungsorientiert, offen für Einwanderung und bieten stabile politische Rahmenbedingungen. Die Bilanz für Russland sieht schlechter aus, vor allem wegen des zu erwartenden Bevölkerungsrückgangs und seiner aus dem Kommunismus stammenden, schlecht an die natürliche Umwelt angepassten Infrastruktur.

»Smith stellt sich Schwarzafrika im Jahr 2050 als einen ›heruntergekommenen, übervölkerten und gefährlichen Ort‹ vor – wesentlich mehr hat er zu dieser Region nicht zu sagen«

Der Text ist flüssig und spannend geschrieben; Fachjargon wurde komplett vermieden. Der Autor hat darüber hinaus viele persönliche Erlebnisse eingeflochten. Dabei hat die wissenschaftliche Tiefe nicht gelitten: Sie ist in einem 70-seitigen Anmerkungsteil enthalten. Dort finden sich auch zu fast allen Fragen Hinweise auf weiterführende wissenschaftliche Veröffentlichungen.

Interessierten Zeitgenossen wird einiges bekannt vorkommen. Vieles hat man aus der Debatte um Nachhaltigkeit, Energieversorgung und Klimawandel bereits anderweitig gehört. Die Leistung des Buchs besteht in der konsistenten Zusammensetzung so vieler Mosaiksteine zu einem plausiblen Ganzen. Das ist in Kombination mit der in bestem Sinn populärwissenschaftlichen Sprache das Hauptargument, dieses Werk zu lesen. Es erzählt eine plausible und gut belegte Geschichte der nächsten Jahrzehnte.

Allerdings leidet es unter einer grundsätzlichen Unklarheit: Will der Autor, wie er zu Beginn sagt, in einem Gedankenexperiment erkunden, wie die Zukunft aussehen kann, oder, wie viele Passagen im Text vermuten lassen, prophezeien, wie die Zukunft aussehen wird? Mehrfach formuliert der Autor »ich sehe«. Wissenschaftler sind aber keine Propheten.

Ein zweites Manko liegt in einer deutlich sichtbaren Einseitigkeit. Es geht nicht wirklich um »die Welt« im Jahr 2050, sondern vor allem um den Norden. Der Autor hat wohl eine Schwä-

che für diese Gebiete und ist sichtlich immer wieder froh, wenn er positive Entwicklungsmöglichkeiten für sie aufzeigen kann. Das ist alles in Ordnung. Ärgerlich nur, dass dabei der Süden aus dem Blick gerät. Außer düsteren Andeutungen, dass er sich Schwarzafrika im Jahr 2050 als einen »heruntergekommenen, übervölkerten und gefährlichen Ort« vorstellt, kommt da nicht viel. An dieser Stelle weckt der Titel falsche Erwartungen.

Insgesamt bietet das Buch trotz dieser Schieflage einen wohl einmaligen Einblick in die Komplexität der Welt heute, insbesondere in Bezug auf den Umgang der Menschen mit der natürlichen Umwelt und die systemischen Wechselwirkungen, die Vorhersagen und Gestaltung so schwer machen.

Armin Grunwald
Der Rezensent ist Professor für Technikethik in Karlsruhe; er leitet das Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) sowie das Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB).

Johannes Winterhagen
Abgeschaltet
Was mit der Energiewende auf uns zukommt
Hanser, München 2012. 252 S., € 17,90

ENERGIE

Pflichtlektüre für Entscheider

Das ist man bei dem heiß umstrittenen Thema Energiewende gar nicht mehr gewohnt: Johannes Winterhagen praktiziert die klassischen Tugenden sachliche Korrektheit, Informationsfülle und Ausgewogenheit.

Die Überraschung ist groß. Da hat sich ein in der Energiebranche unbekannter Technikjournalist darangemacht, die Energiewende zu hinterfragen! Seit Jahren verfolgen Experten, Unternehmer, Umweltaktivisten und Politiker ihre eigenen Positionen. Und nun legt dieser Grünschnabel mit seinem unscheinbaren Buch die gewaltige Herausforderung offen und hinterfragt Lösungswege.

Eigentlich wollte Johannes Winterhagen zu Beginn seiner mehrjährigen Recherche nur in Erfahrung bringen, wie eine umweltfreundliche Energieversorgung in der Zukunft aussehen könnte – wissend, dass für den fortschreitenden Klimawandel der CO_2-Anstieg in der Atmosphäre verantwortlich ist. Doch unmittelbar nach Fukushima überholte ihn die politische Dynamik. Kanzlerin Merkel rief den Ausstieg aus der Atomkraft und die Energiewende aus. So bekam sein Vorhaben aktuelle Brisanz und einen neuen Fokus.

Weil Winterhagen stets auf dem Boden der Fakten bleibt, liefert er das wahrscheinlich Beste zur Energie der Zukunft, das derzeit im Angebot ist – für den interessierten Laien wie für den Fachmann, der die Übersicht behalten will. Nüchtern und gleichwohl spannend analysiert er das Problem und bietet allen Lösungsvarianten genügend Raum. Er bleibt neutral, versucht nicht, ins Blaue zu spekulieren oder gar die einzig beste Lösung aus dem Hut zu zaubern.

Nebenbei ist das Werk ein bisschen Abenteuerbuch für Jugendliche, denn Winterhagen geht an vielen Stellen auf die Fragen seiner Kinder ein, denen er das Werk auch gewidmet hat. Nach der Einführung mit Jim Knopf und der Wilden 13 geht es um den wissenschaftlichen Wettlauf, den sich Julius Robert von Mayer (1814–1878) und James Prescott Joule (1818–1869) in den 1840er Jahren um die Entdeckung des Energieerhaltungssatzes lieferten.

Bis heute hat sich ihre Erkenntnis noch nicht überall herumgesprochen: Jedes Jahr werden hunderte neue Erfindungen zum Patent angemeldet, die auf ein Perpetuum mobile hinauslaufen, also eine Maschine, die aus dem Nichts neue Energie gewinnt und so die Menschheit beglückt. Tragisch, dass so etwas unmöglich ist. Winterhagen hat Recht: Wenn dies gelänge, wäre sein Buch entbehrlich – und die Energiewende sowieso.

Die größte Stärke des Autors ist unzweifelhaft die Ausgewogenheit, mit der er die vielfältigen Energieformen und ihre Umwandlungen im Einzelnen vorstellt. Völlig unaufgeregt, nahezu wissenschaftlich legt er Vor- und Nachteile offen, macht deutlich, dass »Speicherung« immer nur vorübergehend und mit Verlusten behaftet ist.

An der Kapitelfolge kann man den Erkenntnisprozess Winterhagens nachvollziehen. Zuerst widmet er jeder »alternativen Energie« von Wasser- über Windkraft und Fotovoltaik bis hin zu Solar- und Geothermie und schließlich Biomasse ein eigenes Kapitel. Da ihr Hauptproblem die heftig schwankende und kaum vorausberechenbare Verfügbarkeit ist, bespricht er folgerichtig Speichertechnologien und Infrastrukturen, die den fluktuierenden Strom aus erneuerbaren Energien zwischenlagern und zur richtigen Zeit am richtigen Ort bereitstellen sollen.

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

Hier spielt das Elektroauto als virtueller, verteilter Speicher im Smart Grid, dem intelligenten Stromnetz der Zukunft, eine wesentliche Rolle. Wären die 50 Millionen Pkws auf unseren Straßen alle mit einer ordentlichen Batterie von 200 Kilowattstunden Speicherkapazität ausgerüstet, könnten sie »eine knappe Woche lang Deutschland fast allein mit Strom versorgen und so auch eine längere Windflaute bei gleichzeitigem heftigem Schneefall überbrücken«.

Weltweit trifft er Forscher am Arbeitsplatz, besucht amerikanische Solarthermiewerke, Offshore-Windparks in England, Geothermieanlagen in Bayern oder die »energieautarke« Insel Samsø in Dänemark, die trotzdem für alle Fälle ein Stromkabel zum Festland besitzt. Die Reise nach China, wo sich die Energiefrage mit noch größerer Schärfe stellt, steht noch aus.

»Die Batterien von 50 Millionen Elektroautos könnten Deutschland eine knappe Woche lang mit Strom versorgen«

Hier wie an anderen Stellen begnügt sich Winterhagen nicht mit technischen Beschreibungen und Rechnungen, sondern geht auch mit Industrie und Politik ins Gericht. »Dass man sich auf Aufholjagd befindet, bestreiten selbst Automanager mit Benzin im Blut nicht.« Gemeint ist: Erst haben sie die Entwicklung verschlafen, nun lassen sie sich von der Politik mit Fördergeldern zum Jagen tragen. Zum Ziel der Bundesregierung, bis 2020 eine Million Elektrofahrzeuge auf die Straße zu bringen, äußert er skeptisch: »Es gilt allerdings als offenes Geheimnis, dass es nicht mehr zu halten ist.«

Wasserstoff, Brennstoffzelle, der zehn Millionen teure Druckluftspeicher ADELE, bei dem der Energieversorger RWE die Federführung des EU-Projekts hat, oder auch Pumpspeicherwerke: Alle Technologien nimmt sich der Autor der Reihe nach vor.

Für die Wasserspeicher fährt er eigens nach Alta in Norwegen, um herauszufinden, ob das Land bereits genügend Energie für ganz Europa speichern könnte. Immerhin erzeugt es 99 Prozent seines Stroms aus Wasserkraft und verfügt über 50 Prozent der europäischen Reservoirkapazitäten. Doch vor Ort muss Winterhagen erkennen, dass die abrufbare Leistung begrenzt ist. Zu schnelles Ablassen der gespeicherten Wassermassen würde die technischen Einrichtungen beschädigen. Quintessenz seiner Interviews: »Die norwegische Batterie könnte uns fünf windstille Tage lang mit 16 Gigawatt Energie versorgen« – solange Deutschland der einzige Nachfrager wäre.

Überhaupt sind seine Reportagen brillant. Dabei versteht er es, exakte Zahlen so geschickt einzubauen, dass der Leser nicht darüber stolpert.

Obgleich die Techniken zu alternativen Energien durch neue Materialien, veränderte Konstruktionen oder effizientere Verfahren noch erheblich an Ertrag zulegen können, werden sie nicht so viel Strom liefern, wie sich die Politik erhofft. Da der Atomausstieg nun besiegelt ist, so die bittere Erkenntnis Winterhagens, müssen wir für die Grundversorgung vorläufig auf fossile Brennstoffe zurückgreifen, mit den bekannten negativen Auswirkungen. Wahrscheinlich werden wir noch viele Jahre und Jahrzehnte mit ihnen leben müssen.

Zum Schluss formuliert Winterhagen sechs Thesen: 1. Energiesparen rettet die Welt nicht; 2. Wind- und Sonnenstrom reichen auf absehbare Zeit nicht aus; 3. Es geht nicht ohne große zentrale Kraftwerke; 4. Neue fossile Kraftwerke sollten Vorfahrt erhalten; 5. Die Energieforschung muss intensiviert werden; 6. Vergessen wir den Konsens! Streiten wir über den Weg!

Besonders die letzte These unterstreicht, dass sich alle um die Zukunft der Energie Gedanken machen müssen. Dafür liefert das Buch eine ideale Basis. Es sollte jedem Politiker als Pflichtlektüre empfohlen werden.

Reinhard Löser
Der Rezensent ist promovierter Physiker und habilitierter Volkswirt; er arbeitet als freier Journalist in Berlin.

LESERSHOP

Jahrgangs-CD-ROM SdW 2011

Die CD-ROM bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bildern) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Diese sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche ab der Erstausgabe 1978. Die CD-ROM läuft auf Windows-, Mac- und Unix-Systemen (der Acrobat Reader wird mitgeliefert).
Des Weiteren finden Sie das **Spektrum.de**-Archiv mit zirka 11 000 Artikeln. **Spektrum.de** und das Suchregister laufen nur unter Windows.
Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,– (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland);
ISBN 978-3-941205-92-5
spektrum.com/recherche

Weitere Produkte finden Sie auch unter **www.spektrum.de/lesershop**

Spektrum
DER WISSENSCHAFT
WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

Jordi Quoidbach

Glückliche Menschen leben länger. Experimentelle Streifzüge in die Psychologie der Lebensführung

Aus dem Französischen von Jutta Bretthauer. Springer Spektrum, Heidelberg 2012. 220 S., € 14,95

Der Psychologe und Glücksforscher Jordi Quoidbach schildert und deutet in vielen kleinen Kapiteln eine Menge psychologischer Studien, deren Teilnehmer ihr Glücksempfinden bewerten. Wer sich abends vor dem Einschlafen kleine angenehme Ereignisse des nächsten Tages vorstellt, wird sich schon nach kurzer Zeit wohler fühlen, wer aber schöne Erlebnisse ins Tagebuch schreibt, verdirbt sich damit die Stimmung. Zu jedem solchen statistischen Ergebnis liefert Quoidbach ein Rezept für Zufriedenheit. Manche sind sehr albern: Lächle kräftig auf Fotos – denn wer das auf dem Abschlussfoto der Schule tat, wurde später ein glücklicherer Mensch. Das Buch ist unterhaltsam, informativ und anregend – aber nehmen Sie den Inhalt nicht in jedem Punkt ernst! ADELHEID STAHNKE

Harald Fritzsch

Mikrokosmos. Die Welt der kleinsten Teilchen

Piper, München 2012. 192 S., € 19,99

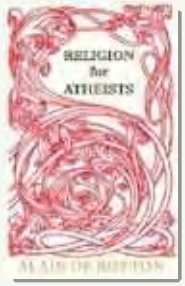
Harald Fritzsch lädt wieder berühmte Physiker zu einem fiktiven Gespräch – diesmal über sein eigenes Forschungsgebiet. Neben Einstein, Newton und dem Alter Ego des Autors tritt Murray Gell-Mann auf, der das heutige Bild der Teilchenphysik prägte. Bei aller Erfahrung des Autors, schwierige Konzepte im Plauderton zu vermitteln, werden unbedarfte Leser einigen Ausflügen in die Gruppentheorie kaum folgen können. Bei den Eichbosonen wirft selbst Einstein ein: »Mein Gott, ist das schwierig!« Newton dagegen verwendet ganz selbstverständlich den Begriff »Quantenzahl« – und ist sonst meist zum Stichwortgeber degradiert. Immerhin erfordert es keine Konzentration, der langweiligen Rahmenhandlung zu folgen, die das Gespräch in Kapitel ordnet. Gut bedient ist mit der Lektüre, wer die Entwicklung des teilchenphysikalischen Theoriegebäudes nachvollziehen will. Wer Begriffe wie »Eichtheorie« fürchtet, dem wird auch das Buch die Angst davor nicht nehmen. MIKE BECKERS

Alexander Hesse (Hg.)

Deutschlands Supergrabungen

Theiss, Stuttgart 2012. 176 S., € 19,95

Das Begleitbuch zum Zweiteiler der Fernsehserie »Terra X« präsentiert 20 bedeutende archäologische Fundstätten. Dem Team aus Redakteuren und dem Archäologen Matthias Wemhoff gelingt es, auf je acht Seiten den Bogen von der Entdeckung einer Stätte über ihre Erforschung bis hin zur Rekonstruktion der Vergangenheit zu schlagen. Dem medienwirksamen Titel entsprechend finden sich neben weniger Bekanntem wie mittelalterlichen Silberminen oder den Freizeitaktivitäten barocker Mönche »Stars« wie der Löwenmensch vom Lonetal, die Himmelsscheibe von Nebra, das Mädchen aus dem Moor oder Ötzi, dessen Aufnahme in das Buch die Autoren mit seiner länderübergreifenden Bedeutung rechtfertigen. Spannende Einblicke in die Methodik führen den Leser mal ins Physiklabor, mal auf den Tieflader. Auch vor unbequemen Themen wie Raubgrabungen oder dem Landhunger unserer Industrienation scheuen die Autoren nicht zurück. KLAUS-DIETER LINSMEIER



Alain de Botton

Religion for Atheists. A Non-Believer's Guide to the Uses of Religion

Hamish Hamilton, London 2012. 320 S., £ 14,99

Eindringlich legt der Autor dar, wie Religionen tief verwurzelte menschliche Bedürfnisse befriedigen, die in einer säkularen Welt, die dem Götzen des Erfolgs huldigt, ungestillt bleiben: etwa der Wunsch nach einer Gemeinschaft gleich geachteter Individuen, die Anerkennung als Mensch trotz aller Schwächen oder Hilfe beim Umgang mit der eigenen Schuld. Der Atheismus sollte, so das Kredo von de Botton, vom hohen Ross der reinen Rationalität herabsteigen und nach dem Vorbild religiöser Zeremonien auch Wege entwickeln, praktische Lebenshilfe zu leisten. Die Vorschläge dazu wirken allerdings teils naiv bis hin zur Lächerlichkeit – so das »Agape-Restaurant«, in dem Wildfremde beim kollektiven Schmausen nach festem Ritual, inklusive Orgien an Fasching, zum intensiven Gefühl gegenseitiger Verbundenheit finden sollen. Ich fürchte, wer der Tröstungen des Glaubens bedarf, muss letztlich doch mit dem Original vorliebnehmen. GERHARD TRAGESER

Heinrich Päs

Die perfekte Welle

Mit Neutrinos an die Grenzen von Raum und Zeit – oder warum Teilchenphysik wie Surfen ist

Piper, München 2011. 272 S., € 19,99

TEILCHENPHYSIK

Verrückte Neutrinos

Heinrich Päs erzählt die unglaubliche Geschichte der Elementarteilchenforschung und spekuliert über Zeitreisen und Extradimensionen.

Physik ist wie Surfen. Oder wie LSD. In seinem ersten populärwissenschaftlichen Werk nimmt uns Heinrich Päs, theoretischer Physiker an der Universität Dortmund, mit auf einen außergewöhnlichen Trip durch die Geschichte der Teilchenphysik – und zwar vor allem die Geschichte der kreativen Leistungen. Überraschende Anekdoten, Ausflüge in Philosophie und Kosmologie sowie futuristische Spekulationen machen es schwer, das Buch aus der Hand zu legen. Ein Schwerpunkt liegt auf der Erforschung der Neutrinos, »völlig verrückter Teilchen«, von denen die meisten die ganze Erde durchfliegen, ohne sich je bemerkbar zu machen.

Just zum Erscheinungsdatum des Buchs machten die Nachrichten von überlichtschnellen Neutrinos die Runde. Inzwischen ist klar, dass der Meldung ein Messfehler zu Grunde lag (Spektrum der Wissenschaft 5/2012, S. 21); aber das Buch ist deshalb nicht weniger aktuell. Die Erforschung der Neutrinos könnte viel zur Erweiterung des physikalischen Weltbilds beitragen. Vielleicht liefern sie gar »den Schlüssel zur Entwicklung des Universums«, wie der Autor andeutet.

Päs beginnt mit einem Ausflug in die antike Philosophie. Ob die griechischen Denker sich tatsächlich von Drogenerlebnissen beeinflussen ließen, mag man glauben oder nicht; doch offenbar haben sie einige Konzepte der modernen Physik vorweggenommen. So suchen heutige Teilchenphysiker nach Hinweisen, ob alle Teilchen und Kräfte Zustände einer einzigen Urkraft sein könnten – darüber dachte schon Platon nach.

Neutrinos könnten uns dank ihrer besonderen Eigenschaften verraten, ob eine solche Urkraft existiert; doch die »Geisterteilchen« widersetzen sich hartnäckig ihrer Erforschung. Da sie kaum mit Materie wechselwirken, erfordert ihr Nachweis riesige, äußerst empfindliche Detektoren. Der Autor erzählt von den erstaunlichen Anstrengungen, zu denen sich Forscher angesichts der experimentellen Schwierigkeiten inspirieren lassen: Die Detektoren von IceCube befinden sich tief unter der antarktischen Eisdecke, und für ein Experiment wurde sogar Blei von römischen Galeeren vom Meeresboden heraufgeholt!

Die Herkulesarbeit hat bereits spannende Erkenntnisse über die Neutrinos erbracht, obwohl die Messergebnisse nicht leicht zu deuten sind. Eines zumindest ist klar: Neutrinos sind um ein Vielfaches leichter als sämtliche anderen Materieteilchen. Doch warum ist das so, und woher bekommen sie überhaupt ihre Masse? Eine Erklärung könnte auch Antworten auf viele andere offene Fragen liefern – wie diejenige, warum es im Universum überhaupt Materie gibt anstatt nur Strahlung.

Neutrinos könnten sogar durch versteckte Dimensionen reisen, die für unsere Wahrnehmung zu klein sind. Päs spekuliert über Zeitreisen durch solche Extradimensionen und darüber, wie Zeitmaschinen aussehen könnten. Ob diese für Menschen funktionieren würden, ist zweifelhaft, doch wer weiß – vielleicht werden eines Tages Neutrinos Botschaften in die Vergangenheit oder Zukunft übermitteln.

Die Entwicklung und Überprüfung naturwissenschaftlicher Ideen hängt immer vom Einfluss der Kultur ab, in welcher der Forscher zu Hause ist, sowie von dessen Eigenheiten und Träumen. Das zeigt der Autor mit oft haarsträubenden Anekdoten, die Wissenschaftler als Menschen interessant machen. Eine der harmloseren: Werner Heisenberg musste wegen Heuschnupfen zwangsweise einen Urlaub auf Helgoland verbringen. Er bekämpfte die Langeweile mit Klettern, Gedichteauswendiglernen und Rechnen – und erarbeitete ganz nebenbei die mathematische Grundlage der Quantenmechanik.

Auf Geschichten von Surftrips auf Hawaii und von der Hamburger Reeperbahn folgen physikalische Details aus Quantenmechanik oder Supersymmetrie. Und auch wenn sich der Autor öfter in Schwindel erregende Abstraktionshöhen aufschwingt, schafft er es doch auf unnachahmliche Weise, den Leser bei der Stange zu halten. Dank übersichtlicher Hervorhebungen und Zusammenfassungen bleibt diesem stets das Gefühl, zumindest den großen Zusammenhang zu verstehen.

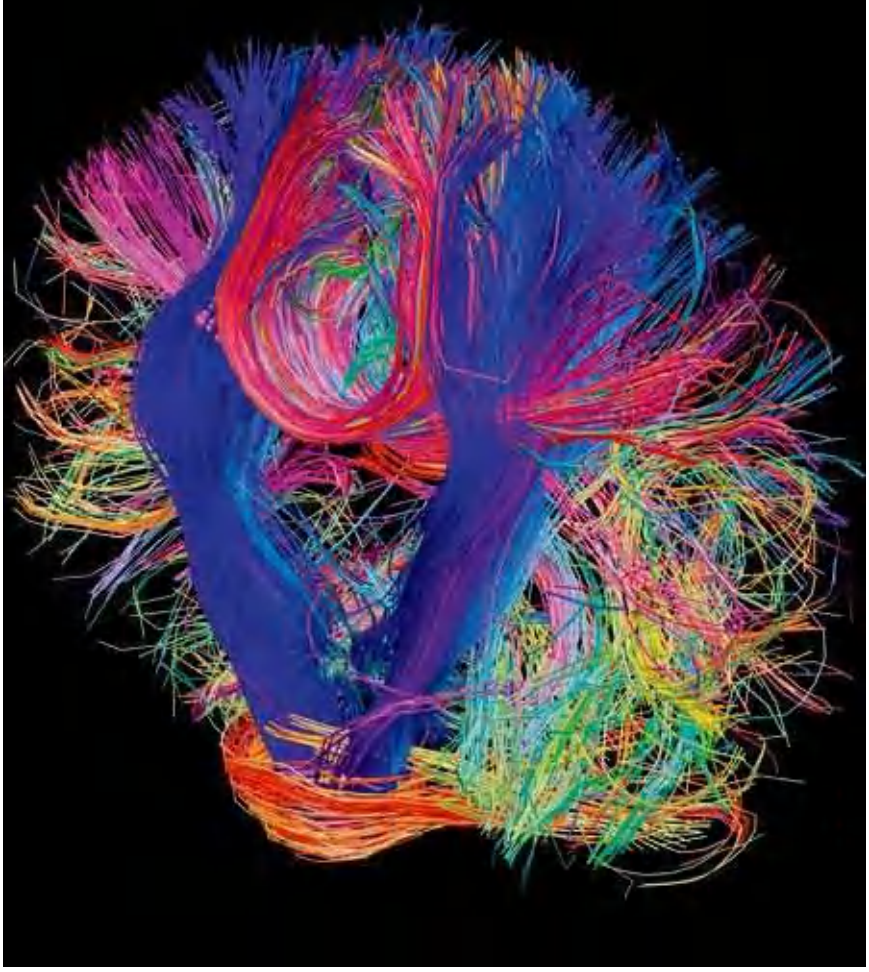
Wer sich vorher wenig mit Teilchenphysik beschäftigt hat, wird allerdings mit einem Wust neuer Begriffe und Konzepte überschüttet. Ein Glossar zum schnellen Nachschlagen wäre hilfreich gewesen – was war noch einmal der »Seesaw-Mechanismus«, und was bedeutet die Abkürzung »LSND«? Ein wenig Abhilfe schafft das ausführliche Inhaltsverzeichnis, und wer tiefer in das Thema eindringen will, findet ein gut sortiertes Literaturverzeichnis vor. Rechnen Sie nicht damit, alles beim ersten Lesen zu verstehen, wohl aber mit einem außergewöhnlichen Einblick in die moderne Physik.

Manuela Kuhar

Die Rezensentin ist Physikerin und promoviert an der Universität Würzburg.

BrainSCaleS und das Human Brain Project

Mehr als 100 Milliarden Nervenzellen, verschaltet zu einem Netzwerk mit rund einer Billiarde Verbindungen, machen unser Gehirn zu einem der komplexesten Dinge überhaupt. Um es besser zu verstehen, wollen Forscher in zwei großen Projekten seine Funktionsweise in bisher nicht da gewesenem Umfang nachahmen – die einen per Simulation mit Computern, die anderen über die Emulation durch physikalische Modelle.



ARTHUR W. TOGA, LABORATORY OF NEURO IMAGING, UND RANDY BUCKNER, MARTINOS CENTER FOR BIOMEDICAL IMAGING (WWW.HUMANCONNECTOMEPROJECT.ORG)

GETTY IMAGES / BRENT STIRTON

Unser wahrer Urahn?

Zwei Millionen Jahre alte Skelette aus Südafrika erschüttern das Weltbild der Paläontologen. Wider alle Erwartungen könnte diese kürzlich entdeckte Hominidenart am Ursprung der Menschengattung *Homo* stehen. Der neue Fundort verspricht eine Anzahl weiterer erhellender Fossilschätze.

KENN BROWN & CHRIS WREN, MONDOLOTHIC STUDIOS

Auf dem Weg zur Vereinigung der Naturkräfte

Bei den heftigsten Teilchenkollisionen versagen alle gängigen Beschreibungen, doch ein neuartiger Ansatz verspricht die Lösung. Was Physiker besonders begeistert: Die Schwerkraft fügt sich zwanglos in das theoretische Modell.

Neues aus dem Reich des Krösus

Weil er einen Spruch des Orakels von Delphi falsch auslegte, führte der lydische König Krösus sein Reich in den Untergang. Schon in der Antike war Lydien ein Mythos. Um dessen historischen Kern zu erforschen, graben Archäologen in der einstigen Hauptstadt Sardis und jetzt auch in der lydischen Provinz.

Geothermie

In verschiedenen Pilotanlagen versuchen Ingenieure, die Erdwärme für Kraftwerke nutzbar zu machen. Doch sind manche Probleme – wie Mikrobeben – noch nicht wirklich gelöst. »Spektrum der Wissenschaft« untersucht, welchen Beitrag die Geothermie für den Energiemix der Zukunft leisten kann.

NEWSLETTER

Möchten Sie regelmäßig über die Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?

Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:
www.spektrum.com/newsletter

DIE VORTEILE EINES ABONNEMENTS

So vielfältig wie unser Magazin!

1 12 Ausgaben zum Preis von nur € 84,– inkl. Versand Inland (statt € 94,80 im Einzelkauf); für Schüler, Studenten und Azubis auf Nachweis sogar nur € 69,90

2 2 in 1: Sie erhalten nicht nur die Printausgabe, sondern können auch schon drei Tage vor dem Erstverkaufstag auf die Digitalausgabe zugreifen!

3 Kostenloser Zugriff auf das Onlineheftarchiv von **Spektrum der Wissenschaft** mit fast 9000 Artikeln

4 Bonusartikel und Gratisdownloads ausgesuchter Sonderhefte im Internet

5 Verbilligter Erwerb des Produkts des Monats

Produkt im August

»Magie im Bild«
Spiegel-Anamorphosen-Set zum Staunen und Selbermachen

6 **Zusätzlich für Ihre Abobestellung erhalten Sie ein Präsent Ihrer Wahl!**

Weitere Präsente finden Sie im Internet ...

Die **DVD »Das Wunder des Lebens«** von Lennart Nilsson dokumentiert die abenteuerliche Entstehung eines Menschen. In bis zu 2000-facher Vergrößerung wird einer der dramatischen Abschnitte der Entstehung bis hin zur Geburt eines Babys gezeigt. Ca. 45 Minuten Laufzeit

Das fadengeheftete **Din-A4-Spektrum-Artbook** bietet Ihnen auf 160 Seiten Platz für Ihre Notizen. Mit Verschluss- und Lesezeichenband sowie einer Stiftschlaufe.

Das **Buch »Die großen Fragen – Universum«** behandelt grundlegende Probleme und Konzepte in der Wissenschaft, die Forscher und Denker seit jeher umtreiben.

Dieses und zusätzliche Aboangebote wie **Geschenkabo**, **Miniabo** oder **Leser-werben-Leser-Abos** finden Sie unter:

www.spektrum.de/abo

Spektrum DER WISSENSCHAFT
WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

online: spektrum.de/abo
E-Mail: service@spektrum.com
Tel.: +49 6221 9126-743
Fax: +49 6221 9126-751

Unser besonderer Tipp:

MENDOCINO-MOTOR, FERTIGMODELL

Im Magnetfeld frei schwebender Solarmotor

Rotor aus Acrylglas, Bodenplatte aus Echtglas, Maße: 20 x 10 x 10 cm, Carl Aero

Bestell-Nr. 3652 € 159,–

Bei diesem Solar-Elektromotor handelt es sich um eine Konstruktion, die schon auf den ersten Blick Aufmerksamkeit erregt. Oft wird erstaunt gefragt, wie sich ein solcher frei schwebender Körper überhaupt in Bewegung versetzt.

Der Motor verfügt über eine Lagerung aus sechs Hochleistungs-Neodym-Magneten. Dadurch scheint der Anker des Motors frei im Raum zu schweben. Der Anker selbst ist mit hocheffizienten monokristallinen Solarzellen bestückt. Diese liefern nur dann Strom, wenn sie sich im Lauf der Drehbewegung jeweils auf der Oberseite befinden. Die Kommutation dieses Motors findet auf optischem Weg statt. So ist eine Steuerung des Motors vollkommen ohne Bürsten möglich. Weder durch die Achslagerung noch durch Bürsten besteht also ein Reibungswiderstand. Der einzige verbliebene Widerstand besteht in der winzigen Reibung an der Achsspitze und im Luftwiderstand.

Ein Video zum Titel finden Sie hier: www.science-shop.de/artikel/1156118

Ebenfalls lieferbar als Bausatz (Löten erforderlich):
Bestell-Nr. 3653 € 139,–

NEU

ZAHLEN AM LAUFENDEN METER

Albrecht Beutelspachers Mathezollstock

2012, Maße: 24 x 1,6 x 2,8 cm, Metermorphosen

Bestell-Nr. 3650 € 12,90

Der Mathe-Meterstab zeigt Wissenswertes und Überraschendes aus der Welt der Zahlen und Formeln am laufenden Meter: von Pythagoras über Archimedes und Gauß bis zu dem indischen Zahlengenie Ramanujan.

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich

BRESSER VISIOMAR MICROSET 40X-1024X

Mikroskop-Set mit USB-Anschluss

Kunststoffkoffer, Staubschutzhülle, 230-V-Netzteil (5,5 V / 200 mA), Präparatebox mit 5 Dauerpräparaten; Objektträgern und Deckgläschen, Präparierbesteck, Garnelenbrutanlage, MikrOkular II mit Bildbearbeitungssoftware, Meade

Bestell-Nr. 3618 € 89,–

Hochwertiges Schülermikroskop mit Barlow-Linsen-Zoom-System und PC-Okular

Ausgestattet mit einer Barlow-Linse, die die Vergrößerung des Mikroskops bis zu 1,6-fach steigert, ein MikrOkular I (PC-Okular mit 640 x 480 Pixel Auflösung), Ulead-Photo-Explorer-Bildbearbeitungssoftware, USB-Verbindungskabel, 2 optische Okulare und Netzadapter sowie weiterem nützlichen Starter-Zubehör wie: 5 Dauerpräparate, 10 Objektträger, 20 Deckgläser und Staubschutzhülle. Beobachtungsobjekte: Kleinorganismen, Insekten, Pflanzen, kleinere Mineralien.

NEU

NACHTSICHTGERÄT NIGHT EYE 3X42

Restlicht- und IR-Licht-Verstärker, Vergrößerung: 3-fach, Ø Objektiv: 42 mm. Benötigt wird eine CR123A-Batterie (nicht im Lieferumfang enthalten), Omegon

Bestell-Nr. 3655 € 199,–

Sobald es dunkel ist, kann die Beobachtung mit dem *Night Eye* losgehen. Schalten Sie es ein, wird ein grünes Bild sichtbar, das Ihnen jedes Detail vor Augen führt. Die Schärfe ist einstellbar bis 4 dpt. Das *Night Eye* ist ein Restlichtverstärker und funktioniert mit einem Bildwandler, der das Licht um das etwa 1000-Fache verstärkt. Ist Restlicht vorhanden, sind Beobachtungen bis zu 200 Meter Distanz möglich. Und bei absoluter Dunkelheit wird mit einem weiteren Knopfdruck der IR-Licht-Verstärker eingeschaltet. *Night Eye* ist kompakt und mit einer Hand bedienbar. Die schwarze Gummiarmierung schützt das Gerät und bietet einen stabilen Halt in der Hand.

Bestellen Sie direkt: +49 6221 9126-841 @ info@science-shop.de

Die Wissensbecher aus hochwertigem Porzellan sind ein schönes und nützliches Geschenk!

Höhe: 105 mm; Inhalt: 460 ml, spülmaschinengeeignet, Könitz Porzellan

WISSENSBECHER MATHEMATIK
Bestell-Nr. 3430 € 9,95

WISSENSBECHER PHYSIK
Bestell-Nr. 3431 € 9,95

WISSENSBECHER CHEMIE
Bestell-Nr. 3432 € 9,95

NEU

ALBERT-EINSTEIN-BÜSTE

aus Biskuitporzellan

Höhe: 14,5 cm, in weißer Geschenkschachtel; Kämmer

Bestell-Nr. 3651 € 24,90

Ein Schmuckstück für Regal oder Schreibtisch!

Die 14,5 cm hohe Büste wird gegossen, bei 1350 Grad gebrannt und anschließend poliert. Durch das Polieren der Biskuitporzellanmasse erhält die Büstenoberfläche einen feinen, seidenmatten Glanz. Made in Germany!

Hanno Depner

KANT FÜR DIE HAND

Die »Kritik der reinen Vernunft« zum Basteln & Begreifen. Mit Anleitung und 12 Bogen Bausatz

2011, 71 S. m. farb. Abb., 12 Bastelbogen, geb., Knaus

Bestell-Nr. 3629 € 19,99 (D), € 20,60 (A)

Der Bausatz »Kant für die Hand« des Philosophen Hanno Depner ermöglicht einen überraschenden und einzigartigen Zugang zu einem Hauptwerk der Geistesgeschichte. In 3 Stunden Bastelzeit wird Erkenntnis zum Abenteuer und ein Buch auf ganz neue Weise zur besten aller möglichen Beschäftigungen.

Ein Video zum Titel finden Sie unter www.science-shop.de/artikel/1066936

DIE KNOTENBOX

50 Knoten-Klassiker für Freizeit, Sport und Alltag

Mit 2 Schnüren zum Üben in Metallbox, moses

Bestell-Nr. 3617 € 12,95

Der Seemann ann in jeder Lebenslage den richtigen Knoten knüpfen. Aber mit der Knotenbox lernen auch wir Landratten 50 bewährte Knoten mit Hilfe von 50 handlichen Karten und 2 Schnüren. Mit anschaulichen Schritt-für-Schritt-Abbildungen und wissenswerten Sachinformationen rund um Entstehung, Gebrauch und Anwendung der Knoten.

DAS BAUMEISTERSPIEL KLASSIK

Unendliche Vielfalt

Format 12,5 x 12,5 cm, blaue Steine mit grauer Platte aus Recyclingkunststoff, Logika Spiele

Bestell-Nr. 3616 € 16,–

Acht verschieden gestaltete Bausteine, die jeder für sich aus mehreren Einzelwürfeln bestehen, werden auf einer Grundplatte zu den unterschiedlichsten Formen zusammengebaut. Mit seiner unerschöpflichen Vielfalt weckt es den Spielspaß und schult sozusagen spielerisch Gedächtnis, Konzentration, Geduld, Intelligenz und erst recht räumliches Vorstellungsvermögen, Fantasie, Intuition, laterales Denken. Für 1 Spieler.

Besuchen Sie uns im Internet unter:
www.science-shop.de

Für Bestellungen außerhalb Deutschlands und Österreichs berechnen wir € 3,50 Versandkosten. Alle Preise inkl. Umsatzsteuer. Preise unter Vorbehalt. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

ERDE 3.0

GEOTHERMIE

Kommt die Energiewende aus der Tiefe?

SEPTEMBER 2012

Spektrum DER WISSENSCHAFT 9/12

PHYSIK

Neuer Rechentrick zur Vereinheitlichung der Naturkräfte

ANTHROPOLOGIE

Unser wahrer Urahn gefunden?

IMMUNOLOGIE

Nobelpreisträger als Patient im Selbstversuch

Die Simulation des Gehirns

Wie Forscher unser Denkorgan nachbauen

7,90 € (D/A) · 8,50 € (L) · 14,– sFr.
D6179E

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

www.spektrum.de

Unsere Neuerscheinungen

epoc 3/2012

OTTO DER GROSSE – EROBERER, KAISER, MISSIONAR

Als Sohn eines Sachsenherzogs geboren, im geschichtsträchtigen Aachen zum König des Ostfränkischen Reichs gekrönt, Sieger über die Ungarn und schließlich, vor 1050 Jahren, erster Kaiser der Deutschen. In der aktuellen Ausgabe von **epoc** dreht sich alles um Otto den Großen. Aus dem Inhalt:
> Lechfeldschlacht: Legendärer Sieg des »Retters der Christenheit«
> Regentinnen: Die mächtigen Frauen in Ottos Reich
> Magdeburg: Antike Säulen für des Kaisers Kirchen
epoc kostet € 7,90 als Einzelheft und ist auch im Abonnement für € 27,– (vier Ausgaben pro Jahr) inklusive Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 23,–) zu beziehen.

Ahnerts

ASTRONOMISCHES JAHRBUCH 2013

Wo und wann ist welcher Planet am Himmel zu sehen? Welche besonderen Ereignisse sind in der kommenden Nacht zu beobachten? **Ahnerts Astronomisches Jahrbuch 2013** liefert alle wichtigen Informationen für das eigene Erkunden des Sternenhimmels. Der Kalender präsentiert Tag für Tag die bedeutendsten astronomischen Ereignisse. Sternkarten für jeden Monat, Beschreibungen der Himmelsobjekte und viele Astroaufnahmen erleichtern Ihnen die Orientierung am Nachthimmel. Für Einsteiger und fortgeschrittene Sternfreunde ist der **Ahnert** das unentbehrliche Standardwerk.
Zirka 210 Seiten mit zahlreichen, meist farbigen Fotografien und Grafiken. € 10,90 zzgl. Porto, als Standing Order € 8,50 inkl. Inlandsversand, ISBN: 978-3-941205-79-6, ab 28. 9. 2012 im Handel oder unter www.spektrum.com/ahnert zu bestellen.

Spektrum Spezial – Physik · Mathematik · Technik 3/2012

ERDE 3.0: DIE ENERGIE DER ZUKUNFT

Damit die Erde eine Zukunft hat, gilt es jenseits von Erdöl, Gas und Kohle Energiequellen zu erschließen und zu nutzen, die sauber sind und sich nicht erschöpfen. Gerade jetzt, da die Bundesregierung die Energiewende eingeläutet hat und energisch vorantreibt, ist es wichtig zu wissen, welche Möglichkeiten wir haben, von fossilen Rohstoffen unabhängig zu werden. In diesem Heft von **Spektrum der Wissenschaft** beleuchten Experten und Wissenschaftsjournalisten die Chancen und Probleme der verschiedenen Optionen für eine nachhaltige, umweltfreundliche Energieversorgung der Welt.
Das Spezial »Erde 3.0 – Die Energie der Zukunft« kostet € 8,90 zzgl. Versand.
Die Spezial-Reihen können auch unter www.spektrum.de/spezialabo bezogen werden.

GEHIRN&GEIST 9/2012

Zehnmal pro Jahr erwarten Sie in **G&G** spannende Berichte aus folgenden Themengebieten: Psychologie, Hirnforschung, Medizin, Psychiatrie, Psychotherapie, Philosophie, Pädagogik, Religion, Neurotheorie und künstliche Intelligenz. Themen der aktuellen Ausgabe sind:
> ADHS: Was macht KInder hyperaktiv?
> Wahres Ich: Forscher vermessen das Unbewusste
> Wahrer Gott: Rückschau auf 30 Jahre Neurotheologie
> Wahre Lügen: Warum manche Hirngeschädigte konfabulieren
Gehirn&Geist kostet € 7,90 als Einzelheft und ist auch im Abonnement (zehn Ausgaben pro Jahr) für € 68,– inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 55,–) zu beziehen.

Alle Hefte sind im Handel erhältlich oder unter:

Spektrum DER WISSENSCHAFT
WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

online: spektrum.de/lesershop
E-Mail: service@spektrum.com
Tel.: +49 6221 9126-743

Fax: +49 6221 9126-751
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg

Hartwig Hanser
Redaktionsleiter
hanser@spektrum.com

Das Gehirn im Computer

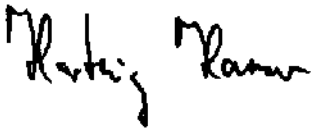
Seit 20 Jahren verfolge ich die Fortschritte bei der Erforschung des menschlichen Gehirns und seiner Funktionsweise: angefangen von Neurobiologievorlesungen im Studium an der ETH Zürich über meine Promotion am Friedrich-Miescher-Institut in Basel, meine Arbeit am »Lexikon der Neurowissenschaft« von Spektrum Akademischer Verlag bis zu meiner Tätigkeit als Redakteur – zuerst für »Gehirn&Geist« und seit 2010 für »Spektrum der Wissenschaft«. Im Verlauf dieser zwei Jahrzehnte erfuhr die Hirnforschung einen geradezu atemberaubenden Aufschwung. Neue Untersuchungstechniken wie bildgebende und genetische Verfahren vermittelten eine überwältigende Fülle von Einsichten in die neuronalen Abläufe. Und das auf verschiedensten Ebenen: von Neurotransmittern und Ionenkanälen bis hin zur Aktivität ganzer Hirnareale. Dennoch – richtig verstanden haben Forscher bis heute nicht, wie das Gehirn funktioniert. Jetzt versuchen sie daher, dem Rätsel aus einer ganz anderen Richtung beizukommen: durch Nachbilden des menschlichen Denkorgans mit Hilfe von Computern.

Am weitesten ist dabei wohl die Arbeitsgruppe von Henry Markram an der EPF Lausanne. Das Forscherteam sammelte jahrelang alle verfügbaren biologischen Informationen über Neurone und ihre Funktionsweise, um 2005 zunächst eine einzelne Nervenzelle per Computer zu simulieren – inklusive der Eigenschaften aller ihrer Bestandteile wie etwa Ionenkanäle. Als Nächstes erweiterten sie das Projekt 2007 auf eine so genannte kortikale Säule; das ist ein Netzwerk aus rund 10 000 Nervenzellen, eine Art Grundeinheit des Gehirns. Jetzt setzt Markram zum großen Sprung an: die komplette Simulation des menschlichen Denkorgans bis zum Jahr 2023. Für dieses »Human Brain Project« haben sich mehr als 100 Forschungsinstitute weltweit zusammengeschlossen. Ab S. 82 erläutert Markram seine kühne Vision – und welchen Erkenntnisgewinn und Nutzen die Wissenschaftler sich davon erhoffen.

Allerdings stehen andere Forscher Markrams Vorhaben kritisch gegenüber, allein schon wegen der ungeheuren benötigten Computerleistung, die derzeit so noch gar nicht zur Verfügung steht. Einer davon ist der Heidelberger Physiker Karlheinz Meier, der Markrams Vorgehensweise für ineffektiv hält. Die Schuld daran sieht er in der Arbeitsweise der dabei verwendeten herkömmlichen Digitalcomputer. Für sein eigenes, ebenfalls europaweit vernetztes Projekt »BrainScaleS« baut Meier daher eigens analoge Rechner aus elektronischen Bauteilen, um Hirnfunktionen zu emulieren statt zu simulieren. Wir baten Meier, sein Alternativkonzept der »neuromorphen Computer« ebenfalls für »Spektrum« darzustellen (S. 92).

Konkurrenz belebt das Geschäft. In diesem Sinne könnten sich beide Herangehensweisen gegenseitig befruchten und ergänzen. Dann rückt ein funktionsfähiges Modell des menschlichen Gehirns vielleicht tatsächlich in greifbare Nähe. Allerdings könnten sich damit noch ganz andere Probleme stellen, etwa ethischer Art: Ist ein solches Gebilde intelligent? Entwickelt es gar Bewusstsein? Und wie gehen wir dann damit um?

Über Fragen wie diese sollten wir heute schon nachdenken, findet Ihr



AUTOREN IN DIESEM HEFT

Henry Markram von der EPF Lausanne (links) und **Karlheinz Meier** von der Universität Heidelberg verfolgen zwei grundsätzlich verschiedene Ansätze, um neuronale Strukturen elektronisch nachzubauen (S. 82, S. 92).

Ab S. 64 berichtet der Archäologe **Oliver Hülden** von der LMU München über neue Ausgrabungen aus dem Reich des legendären Königs Krösus.

AUSGEZEICHNET!

»Spektrum«-Autor **Robert Gast** erhielt am 14. Juli den Junior Science Writers Award der Euroscience-Stiftung in der Kategorie »Nachwuchs«. Gast hat zahlreiche Artikel für uns geschrieben, zuletzt etwa über Wasserkraftwerke in Heft 2/2012.
Gerhard Samulat wurde am 4. Juli für seinen Artikel über Windkraftnutzung in Heft 1/2012 mit dem Fraunhofer UMSICHT-Wissenschaftspreis ausgezeichnet.
Die Redaktion freut sich mit ihren Autoren über die Ehrungen!

3 **Editorial**

6 **Leserbriefe/Impressum**

8 **Spektrogramm**
Algenblüte entsorgt CO_2 • Neandertaler waren tüchtige Fellschaber • Stern verliert plötzlich seine Staubscheibe • Lithium-Luft-Akku funktioniert • Tintenfische zeigen feminine Seite • Dunkle Galaxien

11 **Bild des Monats**
Rückzug der Gletscher

12 **Forschung aktuell**

Wo sind die Neutrinos?
Gammaausbrüche bieten keine Erklärung für energiereiche kosmische Strahlung.

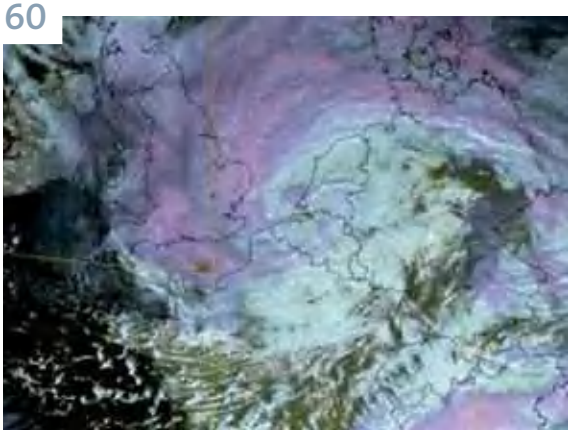
Den Schutzpanzer der Krebszellen ausschalten
Ein neuer Therapieansatz gegen Tumoren.

Immer knapp daneben
Die Gesetze hinter den unsauberen Rhythmen menschlicher Spieler.

SPRINGERS EINWÜRFE
Wie man soziale Netzwerke manipuliert
Einflussnahme per Internet als Forschungsobjekt.

22

38

60


BIOLOGIE & MEDIZIN

▸ 22 **Ein neuer Urahn?**
Kate Wong
In Südafrika entdeckten Forscher einen Vormenschen – möglicherweise den Vorläufer der Gattung *Homo*.

▸ 32 **Patient im Selbstversuch**
Katherine Harmon
Der Nobelpreisträger Ralph M. Steinman wandte seine experimentellen Krebstherapien am eigenen Körper an.

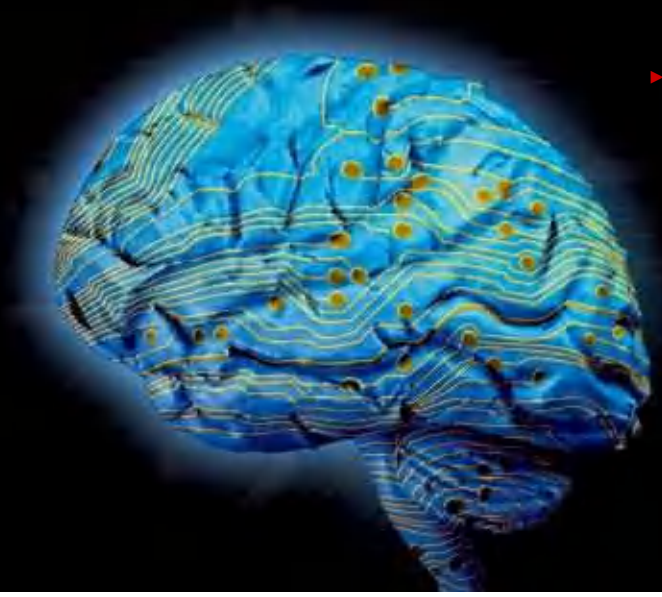
PHYSIK & ASTRONOMIE

▸ 38 **Umfassende Theorie der Naturkräfte**
Zvi Bern, Lance J. Dixon, David A. Kosower
Mit einem Rechentrick könnte es endlich gelingen, eine Theorie aller fundamentalen Wechselwirkungen zu entwickeln.

SCHLICHTING!
46 **Farbenschillernder Nebel**
H. Joachim Schlichting
Die Natur muss erst einmal Wassertröpfchen nach Größe sortieren, damit wir Farbeffekte in Nebelfahnen beobachten können.

ESSAY
48 **Komplexität und Emergenz**
Michael Springer
Die beiden Begriffe sollen das Verhalten unübersichtlicher Systeme beschreiben. Doch was bedeuten sie konkret?

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN
60 **Wie Tief Xynthia Luft holte**
Thomas Rubitzko
Warum strömt die Luft in einer linksdrehenden Spirale in ein Tiefdruckgebiet hinein? Paradoxe Antwort: Weil die Corioliskraft sie nach rechts ablenkt.



▶ TITELTHEMA

Die Simulation des Gehirns

82 Auf dem Weg zum künstlichen Gehirn
Henry Markram
Ein ambitioniertes Projekt zielt darauf ab, in den nächsten zehn Jahren das menschliche Gehirn mittels Supercomputern vollständig zu simulieren.

92 Neurone & Co. – Imitieren mit Silizium
Karlheinz Meier
Um Computern das Denken beizubringen und obendrein das Gehirn besser zu verstehen, bauen Forscher es aus elektronischen Elementen nach.

64 Neues aus dem Reich des Krösus
Oliver Hülden
Schon in der Antike galt das kleinasiatische Lydien als Mythos: Die tragische Geschichte um König Krösus, der ein Orakel Delphis falsch deutete und sein Reich ins Verderben führte, war legendär. Archäologen und Historiker suchen nun nicht nur in der einstigen Hauptstadt Sardis nach seinen Spuren, sondern auch in der lydischen Provinz.

ERDE 3.0

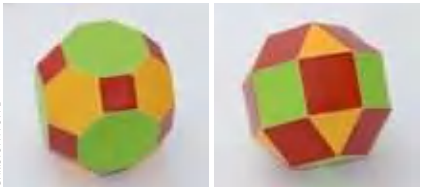
▶ **72 Geothermie: Energie aus der Tiefe**
Karl Urban
In Pilotanlagen versuchen Ingenieure seit Jahren, die Wärme des Erdinneren in Kraftwerken nutzbar zu machen. Bislang blieb allerdings der Beitrag dieser Technologie zum Energiemix abseits vulkanischer Zonen noch überschaubar. Doch auch fernab von diesen, wie in Deutschland oder Australien, lässt sich die Tiefenwärme anzapfen – dank neuer Methoden.

100 Rezensionen
Brian Greene: Die verborgene Wirklichkeit • *Paul Krugman:* Vergesst die Krise! • *Steven S. Pinker:* Gewalt • *Sabine Paul:* PaläoPower • *Mary Roach:* Die fabelhafte Welt der Leichen • *Adam Hart-Davis:* Das Buch der Zeit • *Henning Aubel:* Unser Technikerbe

59 Wissenschaft im Rückblick
Vom Sonnendampfkessel zum Elektronenbeschleuniger

106 Vorschau

Titelmotiv: Spektrum der Wissenschaft / Daniela Leitner
Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet.



CHRISTOPH PÖPPE

Erratum

In »Das ikosidodekaedrische Prismatohexakosihekatonikosachoron« (Heft 6/2012) wurden in der Bildunterschrift auf S. 62 oben bei den beiden letzten der fünf abgebildeten Körper die Namen verwechselt. Es muss heißen »das große [nicht das kleine] Rhombenkuboktaeder (4, 6, 8)« (drittletzte Zeile) und »das kleine [nicht das große] Rhombenkuboktaeder (3, 4, 4, 4)« (letzte Zeile). Heinrich Bubeck aus Ravensburg machte uns auf den Fehler aufmerksam.

Bio-Begrifflichkeiten

Edgardo D. Carosella und Nathalie Rouas-Freiss erklärten, weshalb das mütterliche Immunsystem den Fötus toleriert. (»Wie sich das Ungeborene vor der Mutter schützt«, Juni 2012, S. 22)

Hellmuth Zöltzer, Kassel: Nicht der Embryo produziert den Trophoblasten, sondern nach der Befruchtung entsteht über das Blastomerenstadium die Morula. Die späte Morula enthält zwei verschiedene Zelltypen: den Embryoblasten, aus dem die Strukturen des Embryos hervorgehen, und den Trophoblasten, aus dem die Plazenta und weitere Hilfsstrukturen hervorgehen. Bei der Kontaktaufnahme zwischen Mutter und Kind handelt es sich weder um embryonale Zellen noch um die Gebärmutterschleimhaut im ursprünglichen Sinn. Wiederum sind es hier Trophoblastzellen, und außerdem hat die Gebärmutterschleimhaut in der Kontaktzone die so genannte Dezidua ausgebildet. In dem Bereich oberhalb der Basalplatte der Plazenta existieren keine mütterlichen Blutgefäße, sondern vom Trophoblasten ausgekleidete Räume, durch die das mütterliche Blut fließt. Die embryonalen Blutgefäße befinden sich in den Trophoblastzotten.

Echte und falsche Pilze

Laut Harold Schmitz und Howard-Yana Shapiro bedrohen unter anderem Pilzkrankheiten den empfindlichen Kakaobaum. (»Die Zukunft der Schokolade«, Juli 2012, S. 78)

Ekkehard Gessner, Nottuln: Leider hat Frau Pahler in ihrem Leserbrief in Heft 8/2012 eine richtige Aussage im Artikel falsch verbessert. Während im Originaltext steht, dass *Phytophthora*-Arten »pilzähnliche Organismen« sind, widerspricht sie im Leserbrief mit der Bemerkung, dass *Phytophthora* doch ein Pilz sei. Das entspricht aber nicht dem heutigen Stand der Wissenschaft.

Die Gattung *Phytophthora* (Ordnung Peronosporales, Abteilung Oomycota) gehört nicht zu den Pilzen (Mycota) und ist auch nicht mit ihnen verwandt. Schon 1969 hat Hanns Kreisel in seinem Buch »Grundzüge eines natürlichen Systems der Pilze« die Oomycota aus dem Pilzreich »Eumycota« ausgeschlossen und sie als pilzähnliche Organismen bezeichnet. Diese Auffassung wurde durch neuere elektronenmikroskopische und molekulargenetische Untersuchungen bestätigt.

BRIEFE AN DIE REDAKTION

... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf www.spektrum.de/leserbriefe

Spektrum der Wissenschaft
Leserbriefe / Sigrid Spies
Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

Die vollständigen Leserbriefe und Antworten der Autoren finden Sie ebenfalls unter: www.spektrum.de/leserbriefe

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.)
Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser (Monatshefte), Dr. Gerhard Trageser (Sonderhefte)
Redaktion: Thilo Körkel, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online-Koordinator), Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke, Antje Findeklee (Bild des Monats); E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Editor-at-Large: Dr. Reinhard Breuer
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Referentin des Chefredakteurs: Kirsten Baumbusch
Redaktionsassistenz: Erika Eschwei
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax -751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114
Verlagsleiter: Richard Zinken
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Gerald Bosch, Dr. Markus Fischer, Dr. Michael Springer.

Leser- und Bestellservice:
Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung:
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 7,90 (D/A) / € 8,50 (L) /sFr. 14,–; im Abonnement € 84,– für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Die Preise beinhalten € 8,40 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 8,40 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e.V. erhalten SdW zum Vorzugspreis.
Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Bereichsleitung Anzeigen: Marianne Dölz; Anzeigenleitung: Patrick Priesmann, Tel. 0211 887-2315, Fax 0211 887 97-2315; verantwortlich für Anzeigen: Christian Herp, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887 2481, Fax 0211 887-2686
Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 33 vom 01.01. 2012.
Gesamtherstellung: L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2012 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
75 Varick Street, New York, NY 10013-1917
Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven Inchcoombe, Vice President, Operations and Administration: Frances Newburg, Vice President, Finance, and Business Development: Michael Florek, Managing Director, Consumer Marketing: Christian Dorbandt, Vice President and Publisher: Bruce Brandfon

Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

PRESSE Fachhandel

NEHMEN SIE UNS MIT!

Ausgewählte Magazine aus dem Verlagshaus **Spektrum der Wissenschaft**
nun auch für iPad und Android-Tablets

- alle Artikel im Volltext
- Lesemodus
- zoombare Bilder und Grafiken
- Videoclips & Weblinks
- Lesezeichen
- Suchoptionen

www.spektrum.com/kioskapp

GEOENGINEERING

Algenblüte entsorgt Kohlendioxid

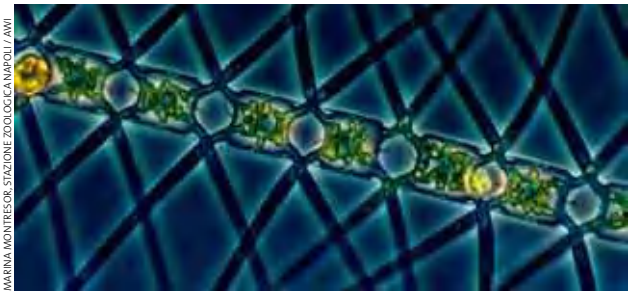
Künstlich ausgelöste Algenblüten können der Atmosphäre langfristig Kohlendioxid entziehen und damit der Erderwärmung entgegenwirken. Das haben Forscher im Experiment »Eifex« belegt. Jedoch lässt sich der Prozess kaum steuern und liefert nur schwer vorhersehbare Resultate.

Das Team um Victor Smetacek vom Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven leitete 14 Tonnen Eisensulfat ins Südpolarmeer ein. Eisen kommt in vielen Meeresregionen nur sehr niedrig konzentriert vor, was das Wachstum von Algen hemmt, da diese das Element unter anderem für die Fotosynthese benötigen. Gelangen große Mengen Eisen ins Ozeanwasser, etwa durch Staub vom Festland oder durch schmelzende Gletscher, führt das zur massenhaften Vermehrung von Algen. Die neu gebildete Biomasse bindet viel Kohlendioxid aus der Atmosphäre.

Auch beim Eifex-Experiment löste die Eisendüngung binnen weniger Wochen eine starke Algenblüte aus, die bis in 100 Meter Wassertiefe reichte. Nach etwa fünf Wochen begannen die Algen abzusterben und zum Grund zu sinken. Mindestens die Hälfte ihrer Biomasse verschwand dabei in mehr als 1000 Meter Tiefe – und wird wohl in den kommenden Jahrhunderten auf dem Meeresboden bleiben.

Allerdings können solche Eingriffe auch andere Folgen haben. Im 2009 durchgeführten »Lohafex«-Experiment ließ sich zwar ebenfalls eine Algenblüte auslösen, doch die Algen wurden sofort von Zooplankton-Organismen gefressen, die das frisch gebundene Kohlendioxid gleich wieder ausschieden. Dass das bei Eifex nicht geschah, liegt daran, dass sich hier vor allem Kieselalgen vermehrten, die eine harte Schale haben und deshalb vor Fressfeinden relativ gut geschützt sind. Zudem sinken sie nach dem Absterben schneller in die Tiefe. Kieselalgen benötigen aber gelöstes Silikat, um ihre Schalen aufzubauen. Da es in vielen Meeren daran mangelt, müsste zum Auslösen einer Blüte auch dieser Stoff extra zugeführt werden. Zudem hängt das Wachstum schwer fressbarer Algenarten noch von anderen, teils unbekannten Faktoren ab.

Nature 487, S. 313–319, 2012



MARINA MONTRESOR, STAZIONE ZOOLOGICA NAPOLI / AWI

Kieselalgen – hier ein Exemplar der Spezies *Chaetoceros atlanticus* – besitzen eine harte Schale. Sie fallen deshalb nicht so schnell Fressfeinden zum Opfer.

ANTHROPOLOGIE

Neandertaler waren tüchtige Fellschaber

Die Skelette von Neandertalern weisen auffallend kräftige rechte Oberarmknochen auf. Eine verbreitete Erklärung dafür lautet, dass diese Frühmenschen intensiv mit Spießen oder Lanzen jagten und sich ihr Knochenbau entsprechend angepasst habe. Colin Shaw von der University of Cambridge (England) und seine Kollegen sind anderer Meinung: Der starke rechte Arm könnte auf handwerklichen Tätigkeiten zurückgehen, etwa das Schaben von Tierfellen.

Zu diesem Schluss kamen die Forscher durch Experimente, in denen sie Männer mit einer Holzstange auf Teppiche und Matten einstechen ließen. Dabei zeichneten sie die Aktivität der beteiligten Muskeln auf. Alle Versuchspersonen waren Rechtshänder und angewiesen worden, mit beiden Händen zuzustoßen. Sie entschieden sich durchweg dafür, den Spieß mit der linken Hand zu führen – diese also weiter vorn am Schaft zu haben als die rechte. Das Ergebnis war eindeutig: Die Brust- und Schultermuskeln der linken Körperhälfte arbeiteten beim Zustechen sehr viel intensiver als die entsprechenden Muskeln der rechten Körperseite.

Außerdem mussten die Teilnehmer mit verschiedenen Werkzeugen einen Teppich bearbeiten, wobei die Bewegungsabläufe denen beim Abschaben eines Fells glichen. Jetzt waren die Muskeln der rechten Körperhälfte deutlich aktiver. Das spricht nach Ansicht der Forscher dafür, dass der starke rechte Arm der Neandertaler unter anderem von der Fellbearbeitung herrührte. Möglicherweise hätten sich die Frühmenschen damit ausgiebiger beschäftigt als mit der Jagd selbst – ein Verhalten, das ihnen vielleicht die Kaltzeiten des Pleistozäns zu überleben half.

PLoS ONE 7, e40349, 2012

CORY L. HOFMANN, UNIVERSITY OF CAMBRIDGE

Ein Versuchsteilnehmer sticht auf einen Teppich ein.

ASTRONOMIE

Stern verliert plötzlich seine Staubscheibe

Innerhalb von nur zwei Jahren scheint sich die Staubscheibe um einen jungen Stern fast aufgelöst zu haben, berichten Astronomen um Carl Melis von der University of California in San Diego. Etwas Vergleichbares ist noch nie beobachtet worden. Auch gegenwärtige astrophysikalische Modelle können das Phänomen nicht zufriedenstellend erklären.

Es handelt sich um den sonnenähnlichen Stern TYC 8241 26521, der 450 Lichtjahre entfernt ist. Messungen aus den Jahren bis 2008 belegen, dass sein Licht damals sehr starke Infrarotanteile enthielt – ein deutlicher Hinweis auf heißen, dichten Staub in der Umgebung des rund zehn Millionen Jahre alten Himmelskörpers. Im Januar 2009 beobachteten die Forscher den Stern durch das Gemini-Süd-Teleskop in Chile. Diesmal war die Intensität des Infrarotlichts auf ein Drittel des Vorjahreswerts abgefallen. Nochmals ein Jahr später zeigten Daten des amerikanischen Weltraumteleskops WISE einen weiteren Rückgang der Infrarotstrahlung um den Faktor zehn.

Offenbar sei die Staubscheibe um den Stern binnen zwei Jahren weit gehend verschwunden, schreiben die Astronomen. Laut Berechnungen muss sie sich dabei aus einem Gebiet zurückgezogen haben, das dem inneren Sonnensystem entspricht. Vermutlich hängt das Phänomen mit einer aktiven Phase der Planetenbildung zusammen – darauf deuten Schätzungen der früheren Staubmenge hin. Die überraschende Geschwindigkeit des Vorgangs wirft ein neues Licht auf die Frage, wie Planeten entstehen.

ILLUSTRATION: GEMINI OBSERVATORY / AURA / LYNETTE COOK

So könnte die Staubscheibe um den Stern TYC 8241 26521 ausgesehen haben, kurz bevor sie sich auflöste.

Nature 487, S. 74–76, 2012

ENERGIESPEICHER

Lithium-Luft-Akku besteht Praxistest

Weltweit suchen Forscher nach leistungsfähigeren elektrischen Batterien. Eine viel versprechende Option ist der so genannte Lithium-Luft-Akku, der theoretisch eine Energiedichte von bis zu 11 Kilowattstunden pro Kilogramm erreicht – das 50-Fache heutiger Lithiumionenbatterien. Seine Anode besteht aus metallischem Lithium, seine Kathode hingegen aus Sauerstoff oder einfach aus Luft. Während des Entladens lösen sich positiv geladene Lithiumionen von der Anode und wandern durch den Elektrolyten hindurch zur Kathode. Die zurückbleibenden freien Elektronen fließen durch einen äußeren Stromkreis – den Verbraucher – zur Kathode und verbinden sich dort mit Sauerstoff und Lithiumionen zu Lithiumperoxid. Beim Aufladen läuft der umgekehrte Vorgang ab.

Das Konzept scheiterte bislang daran, dass an der Kathode stets reaktionsfreudige Sauerstoffspezies entstanden, die entweder mit dem Kathoden-Trägermaterial oder dem Elektrolyten reagierten, wodurch der Akku nur wenige Lade-Entlade-Zyklen durchhielt. Wissenschaftlern um Peter Bruce von der University of St. Andrews (Schottland) ist es nun gelungen, diese Schwierigkeit zu überwinden. Als Trägermaterial für die Kathode verwendeten sie poröses Gold, als Elektrolyt diente das organische Lösungsmittel Dimethylsulfoxid, versetzt mit kleinen Mengen Lithiumchlorat. In diesem Akku erwiesen sich die Reaktionen an der Kathode als hoch reversibel, wodurch er selbst nach 100 Ladezyklen nur 5 Prozent seiner anfänglichen Speicherkapazität verlor.

Für eine Massenproduktion ist der Bautyp wegen der benötigten Goldelektroden zwar zu teuer. Möglicherweise ließen sich aber stattdessen Kohlenstoffelektroden verwenden, die mit Gold beschichtet sind, spekulieren die Forscher.

Science 10.1126/science.1223985, 2012

MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de

Aktuelle Spektrogramme
finden Sie täglich unter

www.spektrum.de/spektrogramm

BIOLOGIE

Tintenfische zeigen ihre feminine Seite

Um sich zu tarnen, können Tintenfische das Muster und die Farbe ihrer Haut ändern. Die Männchen der Art *Sepia plangon* nutzen diese Fähigkeit zusätzlich zum Täuschen von Rivalen. Begegnet ihnen ein Konkurrent, während sie um ein Weibchen werben, dann stellen sie auf der ihm zugewandten Körperhälfte eine unauffällige Tarnfärbung zur Schau, wie sie für Weibchen typisch ist. Auf der zur Angebeteten weisenden Seite jedoch zeigen sie pulsierende Streifen, die Paarungsbereitschaft signalisieren. Das haben Forscher um Culum Brown von der Macquarie University in Sydney, Australien, entdeckt, als sie das Kommunikationsverhalten der Tiere untersuchten (siehe Video unter www.spektrum.de/artikel/1156489).

CULUM BROWN, MACQUARIE UNIVERSITY

Das werbende Tintenfischmännchen (rechts im Bild) gibt sich auf der rechten Körperseite als harmloses Weibchen aus, auf der linken hingegen als feuriger Verehrer.

In der Fortpflanzungszeit kommt es unter *Sepia-plangon*-Männchen häufig zu kräftezehrenden oder gar lebensgefährlichen Angriffen. Mit ihrer halbseitigen Färbetechnik schützen sich die Männchen davor und halten Konkurrenten davon ab, das Paarungsritual zu unterbrechen. So steigern sie ihren Fortpflanzungserfolg.

Die Kopffüßer wenden den Trick allerdings nur an, wenn lediglich ein Rivale in Sicht ist. Denn sobald mehrere auftauchen, wird das Risiko zu groß, dass der Betrug auffliegt. In diesem Fall muss der Entlarvte mit heftiger Bestrafung rechnen.

Biology Letters 10.1098/rsbl.2012.0435, 2012

ASTRONOMIE

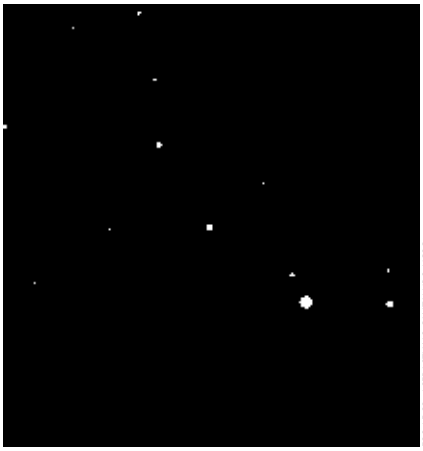
Dunkle Galaxien im Licht eines Quasars

Das Wissen über die frühe Galaxienbildung ist mangels Beobachtungsdaten noch lückenhaft. Viele Theorien gehen von so genannten »dunklen Galaxien« als Vorform heutiger Sterninseln aus. Diese Systeme sollten klein sein und viel Gas enthalten, aber kaum leuchten, weil in ihnen nur wenige Sterne entstehen. Es ist daher äußerst schwierig, sie zu entdecken.

Den bislang überzeugendsten Nachweis ihrer Existenz haben nun Forscher um Sebastiano Cantalupo von der University of California in Santa Cruz erbracht. Sie konzentrierten ihre Suche auf den Bereich um den Quasar HE 0109-3518, dessen intensives ultraviolettes Licht das Wasserstoffgas der Umgebung fluoreszieren lässt. Mit Hilfe lang belichteter Aufnahmen, die das Very Large Telescope in Chile lieferte, konnte das Team mehr als 100 kompakte, fluoreszierende Objekte aus Gas nachweisen. Nach Ausschluss jener Gebilde, die möglicherweise von eigenen Sternen erleuchtet werden, blieben zwölf dunkle Galaxien übrig, die nur im Licht von HE 0109-3518 aufscheinen. Sie enthalten jeweils rund eine Milliarde Sonnenmassen Gas.

Möglicherweise hilft der Befund zu erklären, warum die Zahl der im Universum beobachteten Galaxien kleiner ist, als es das vorhandene Gas erwarten lässt – die praktisch unsichtbaren dunklen Galaxien sind vielleicht schlicht übersehen worden. Einer der Gründe, weshalb in ihnen so wenig Sterne entstehen, könnte ihr geringer Anteil an schweren Elementen sein.

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, im Druck



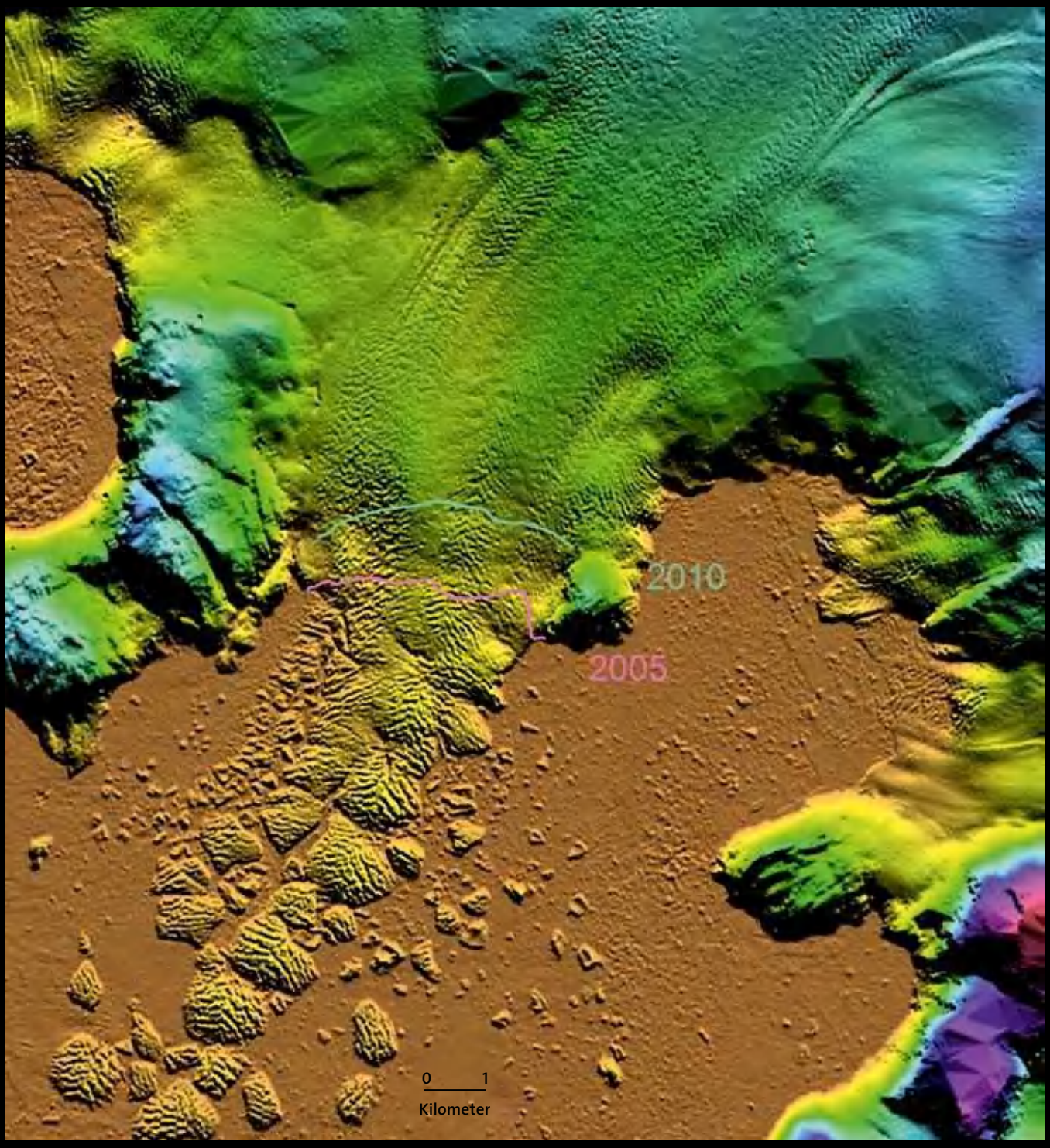
ESO / DSS2 / SEBASTIANO CANTALUPO, UCSC

Der helle Quasar HE 0109-3518 (im roten Kreis) strahlt intensiv im Ultraviolettbereich. Sein Licht lässt mehrere dunkle Galaxien in der kosmischen Nachbarschaft schwach aufglimmen (blaue Kreise). Von selbst leuchten diese kaum, weil in ihnen nur wenige Sterne entstehen. Das macht sie nahezu unsichtbar.

RÜCKZUG DER GLETSCHER

Anhand von Luftaufnahmen aus den 1980er Jahren entstand ein digitales Höhenmodell der grönländischen Eisdecke an der Nordwestküste. Wie hier am Kong-Oscar-Gletscher zeigte sich, dass sich die Eiszungen schon damals deutlich zurückzogen und zahlreiche Eisberge abbrachen. Danach stabilisierten sich die Gletscher wieder, bis sich der Abbau ab 2005 erneut beschleunigte (siehe Markierungslinien für die Gletscherstirn 2005 und 2010). Aktuelle Klimamodelle stützen sich bisher auf Satellitendaten der Eisdynamik, die aber kaum mehr als zehn Jahre in die Vergangenheit reichen – zu wenig, um sichere langfristige Prognosen zu erstellen. Hier kann die neue Methode wichtige zusätzliche Informationen liefern.

Science 337, S. 569–573, 2012



ANDERS A. BJØRK, NATURAL HISTORY MUSEUM OF DENMARK

KOSMISCHE STRAHLUNG

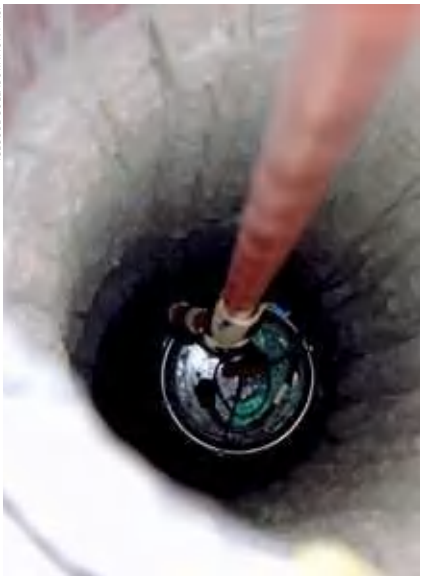
Das Rätsel der fehlenden Neutrinos

Sind Gammastrahlenausbrüche die lang gesuchten Quellen der energiereichen kosmischen Strahlung? Dann müssten sie Unmengen Neutrinos aussenden. Doch trotz zweijähriger Suche hat das größte Neutrinoteleskop der Welt kein einziges extraterrestrisches Geisterteilchen aufgespürt!

VON JAN HATTENBACH

Victor Franz Hess dürfte nicht schlecht gestaunt haben in seinem Heißluftballon irgendwo über Böhmen und Brandenburg, im August 1912. Je höher der Ballon stieg, desto schneller entluden sich seine mitgeführten Elektrometer. Das hatte der österreichische Physiker nicht erwartet. Die ionisierende Strahlung, die für das Entladen der Messgeräte verantwortlich war, sollte nach damaliger Ansicht doch von der Erde ausgehen, also mit der Höhe abnehmen. Das Gegenteil war der Fall, und Hess hatte die richtige Erklärung: Offenbar bombardiert eine energiereiche Strahlung aus dem Weltall unseren Planeten. Diese Entdeckung bescherte Hess den Nobelpreis – und seinen Kollegen bis in die heutige Zeit Kopfzerbrechen.

Denn obwohl Hess' Ballonflug schon hundert Jahre zurückliegt, sind nicht alle Rätsel gelöst. Ein Teil dieser kosmischen Strahlung, die eigentlich eine Teilchenstrahlung ist, stammt aus extragalaktischen Quellen – doch aus welchen? Diese Frage zählt zu den derzeit wichtigsten der Astrophysik. Messungen am modernsten Neutrinodetektor der Welt zeigen nun, dass sie wohl auch bis auf Weiteres unbeantwortet bleiben wird. Möglicherweise müssen die Astronomen sogar eine ihrer Lieblingstheorien aufgeben.



ICECUBE COLLABORATION / NSF

Für IceCube wurden über 5000 lichtempfindliche Sensoren kilometertief ins antarktische Eis eingelassen.

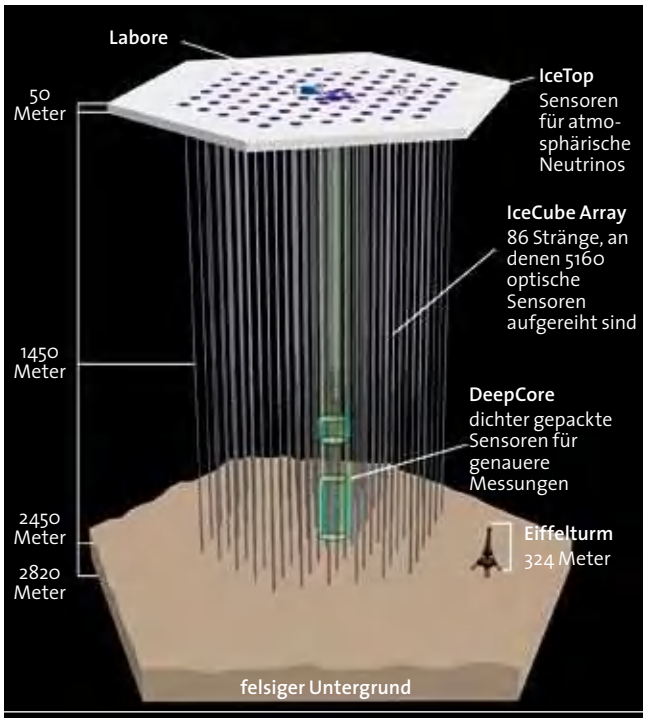
Als heiße Kandidaten für die extragalaktischen Quellen der kosmischen Strahlung favorisieren sie seit Langem Gammastrahlenausbrüche. Solche »Gamma Ray Bursts« (GRBs) sind die gewaltigsten Energieausbrüche, die sich im Weltall beobachten lassen. Viele davon dürften »Todesschreie« verschmelzender Neutronensterne oder energiereicher Supernovae sein, die zu Schwarzen Löchern kollabieren. In ihrer Umgebung werden, so die Vermutung, geladene Teilchen durch starke Magnetfelder beschleunigt. In der kosmischen Strahlung müssten diese als extrem energiereiche Partikel nachzuweisen sein. Solch energiereiche Teilchen finden sich darin tatsächlich – aber stammen sie wirklich aus Gammastrahlenausbrüchen? Diesen Zusammenhang konnten Physiker nun erstmals direkt überprüfen, indem sie versuchten, Gammastrahlenausbrüche im »Licht« der Neutrinostrahlung zu sehen. Zu ihrer Überraschung ließ sich jedoch kein einziges Neutrino nachweisen.

Den Umweg über Neutrinos gingen die Astrophysiker aus einem guten Grund. Denn die energiereichen Teilchen, deren Herkunft sie eigentlich feststellen wollen, sind elektrisch geladen. Sie erreichen die Erde deshalb nicht auf geradem Weg, sondern werden durch Magnetfelder in der Milchstraße und im Sonnensystem auf völlig ungeordnete Bahnen gezwungen. Außerdem reagieren sie unterwegs mit Materie und Strahlung. So verlieren sie auf dem Weg von ihren Quellen bis zur Erde ihre Richtungsinformation. Neutrinos dagegen – jene fast masselosen, kaum zu fassenden Elementarteilchen – sind elektrisch neutral und reagieren nur sehr selten mit Materie. Staubwolken, Planeten, ja ganze Sterne durchdringen sie ungehindert, so dass ihre Flugrichtung direkt zu ihren Entstehungsorten zurückweist. Für Astrophysiker sind sie damit ideale Boten aus dem All – und machen ihnen gleichzeitig das Leben schwer.

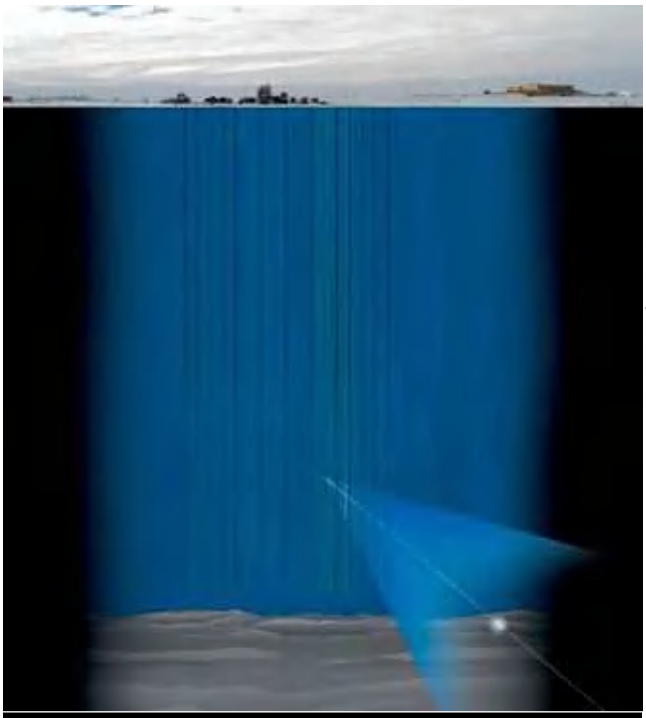
Auch Riesendetektoren finden nur eine Handvoll Teilchen

Denn Teilchen, die mit Materie kaum in Kontakt treten, lassen sich auch schlecht nachweisen. Von den Abermilliarden beständig von der Sonne ausgesendeten Neutrinos durchqueren die allermeisten die Erde völlig unbemerkt. Erst seit wenigen Jahrzehnten gelingt es Physikern, mit ausgeklügelten Experimenten wenigstens einige dieser Sonnenneutrinos aufzuspüren. 1987 wiesen sie sogar erstmals Neutrinos aus einer anderen Galaxie nach: In verschiedenen Detektoren weltweit wurden insgesamt etwa 30 Exemplare gemessen – in einigen Fällen blieb der Nachweis zweifelhaft –, die von einer 160 000 Lichtjahre entfernten Supernova stammten. GRBs sind aber nicht nur energiereicher als Supernovae, sondern auch erheblich weiter entfernt. Um auch nur eine Handvoll ihrer Neutrinos auffangen zu können, benötigt man gewaltige Messinstrumente.

Das größte von ihnen wurde im Dezember 2010 nach einer Bauzeit von



An langen Signalleitungen hängen die optischen Sensoren des IceCube-Observatoriums etwa zwei Kilometer tief im ewigen Eis. Stationen an der Oberfläche ergänzen die Messungen. Sie registrieren atmosphärische Teilchenschauer, die von der kosmischen Strahlung ausgelöst wurden.



LINKS: DANIELLE VEVEA & JAMIE YANG / NSF; RECHTS: ICECUBE COLLABORATION / NSF

Wenn die Signalspur von unten kommt, muss das Teilchen zuvor die gesamte Erde durchquert haben, kann also nur ein Neutrino gewesen sein. Kosmische Neutrinos wurden bislang allerdings nicht gefunden; alle registrierten Teilchen entstammen vermutlich atmosphärischen Schauern.

fast sieben Jahren fertig gestellt. Ein unterhalb der Amundsen-Scott-Station am Südpol gelegener Eisquader von einem Kubikkilometer Größe, »IceCube« genannt (siehe »IceCube – Neutrinojagd am Südpol«, SdW 8/2007, S. 38), dient dabei als Neutrinodetektor. Mit heißem Wasser bohrten die Forscher Löcher hinein und ließen mehr als 5000 lichtempfindliche Sensoren in sie hinab. Die kugelförmigen »Digital Optical Modules« (DOMs) hängen nun in 1,5 bis 2,5 Kilometer Tiefe an 86 langen Kabelsträngen wie Perlen an einer Kette. Jedes DOM ist etwas größer als ein Fußball und registriert schwache Lichtblitze, die durch Myonen ausgelöst werden, schwere Verwandte der Elektronen. Diese geladenen Elementarteilchen entstehen unter anderem, wenn Teilchen der kosmischen Strahlung auf Moleküle der Erdatmosphäre prallen und dabei Kaskaden von Sekundärteilchen erzeugen. Die meisten von IceCube registrierten Myonen stammen aus solchen atmosphärischen Teilchenschauern. Spannender wird es, wenn die Forscher das Licht von Teilchen auffangen, die von »unten« kommen. Weil Myonen in Materie schnell absorbiert werden, müssen diese Exemplare knapp unterhalb des Detektors entstanden sein – erzeugt durch die Wechselwirkung eines Neutrinos mit einem Molekül. Erfassen gleich mehrere DOMs das Licht der Myonenspur, können die Forscher daraus die Flugbahn des Myons und damit die Herkunftsrichtung des ursprünglichen Neutrinos rekonstruieren.

Das Warten auf kosmische Neutrinos hat noch kein Ende

Seit ihrer Fertigstellung registrierte die Apparatur auf diese Weise insgesamt etwa 100 000 Neutrinos. Dennoch ist es den Wissenschaftlern bislang nicht gelungen, auch nur eine einzige Quelle auszumachen: Projiziert auf den Himmel, ergibt sich kein Muster – die Neutrinos stammen gleichermaßen aus allen Richtungen. »Unsere Neutrino-Himmelskarte bleibt vorerst dunkel«, fasste Markus Ahlers von der Universität Wisconsin in den USA und Mitglied der IceCube-Kollaboration diesen Befund im Mai auf einer Fachtagung in München zusammen. Zum einen kam nur ein kleiner Teil der Neutrinos tatsächlich von »unten«. Zum anderen seien selbst diese Neutrinos höchstwahrscheinlich in atmosphärischen Schauern entstanden, nämlich auf der entgegengesetzten Seite der Erde. Auf das erste kosmische Neutrino müssen die Astronomen offenbar noch warten.

Dabei hatten Ahlers und seine Kollegen in den letzten Jahren ganz gezielt nach Neutrinos aus Gammastrahlenausbrüchen gefahndet. Fast täglich leuchtet es irgendwo am Himmel auf, unvermittelt und an völlig zufälligen Positionen. Die Blitze dauern selten länger als einige Minuten, manche sind gar nach Sekunden wieder verblasst. Satelliten überwachen den Himmel darum permanent und leiten ihre Meldungen unverzüglich an boden- und weltraumgestützte Teleskope weiter, damit auch diese das Phänomen in den Blick nehmen. Die Neutrinoforscher bei IceCube

können sich allerdings Zeit lassen. Ihr Teleskop registriert sämtliche aus einem großen Himmelsabschnitt eintreffenden Neutrinos. Anschließend schauen sie in den Daten nach, ob aus den gemeldeten Richtungen in einem bestimmten Zeitraum mehr Neutrinos als üblich gekommen sind.

Vergeblich. Über 300 Gammablitze haben die Forscher untersucht, etwa acht Neutrinos hatten sie nachzuweisen erhofft, gesehen haben sie kein einziges. »Das Ergebnis hat uns überrascht, vielleicht auch ein wenig enttäuscht«, gibt Ahlers zu. Doch selbst diese Nullmessung war der Fachzeitschrift »Nature« eine Veröffentlichung wert *(484 (7394), S. 351–354, 2012)*. Schließlich stellen die IceCube-Daten die gängigen Modelle der Gammastrahlenausbrüche auf eine harte Probe. Haben die Physiker dieses Phänomen überhaupt verstanden – und entsteht die kosmische Strahlung am Ende ganz woanders?

IceCube-Mitarbeiterin Elisa Resconi von der TU München warnt allerdings vor schnellen Schlüssen: »Das Standardmodell der Gammastrahlenausbrüche bekommt durch unsere Messungen Probleme – vom Tisch ist es noch lange nicht.« Einerseits wurden die bislang veröffentlichten Daten mit einem noch unfertigen Detektor gewonnen. Nur etwa die Hälfte der DOMs standen zur Verfügung. Andererseits beruhen die erwarteten Neutrinoflüsse auf vielen Annahmen. Ein paar Veränderungen an den theoretischen Modellen, und das Nullresultat ist keine Überraschung mehr. Die Gammastrahlenausbrüche senden vielleicht einfach weniger Neutrinos aus als gedacht. Dann bräuchte es lediglich einen noch größeren »Eiswürfel« oder einfach mehr Zeit, um ihrer habhaft zu werden.

Doch was, wenn selbst ein vergrößerter Detektor keine Neutrinos aus den GBRs sieht? Theoretiker haben längst Alternativen parat. Beispielsweise könnten auch aktive Galaxienkerne (»Active Galactic Nuclei«, AGN) für die energiereichsten der kosmischen Teilchen verantwortlich sein. AGN werden ebenfalls von Schwarzen Löchern angeheizt, allerdings von solchen, die millionen- oder gar milliardenfach massereicher sind als jene, die bei Gammastrahlenausbrüchen beteiligt sein sollen. Ob sie Neutrinos aussenden, untersuchen Physiker bereits. Die Analyse von AGN-Messungen ist allerdings schwieriger. Anders als bei den kurzen GRB-Ereignissen spielt hier das statistische Untergrundrauschen eine größere Rolle. Erste Ergebnisse werden aber in naher Zukunft erwartet.

Dass man die mysteriösen Verursacher der Strahlung entlarven wird, dessen ist sich Markus Ahlers jedoch sicher. »Wir messen die kosmische Strahlung schließlich seit 100 Jahren, also müssen irgendwo auch ihre Quellen zu finden sein.« Bleibt zu hoffen, dass dies nicht noch einmal 100 Jahre dauert.

Jan Hattenbach ist Physiker und freier Wissenschaftsjournalist in Aachen. Er bloggt auf www.scilogs.de/himmelslichter.

MEDIZIN

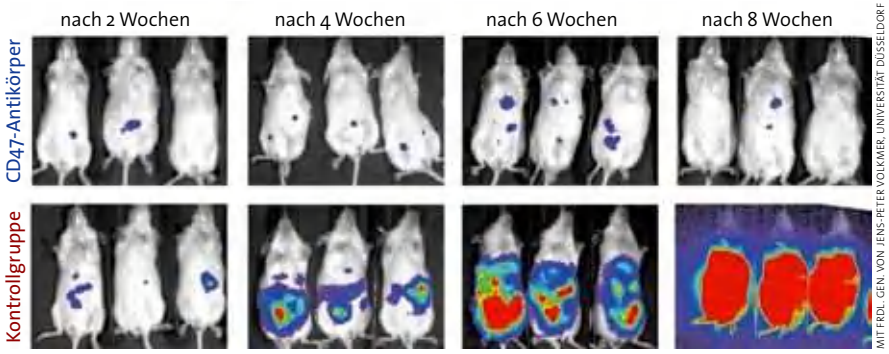
Den Schutzpanzer der Krebszellen ausschalten

Wissenschaftler der Stanford University haben einen neuen Therapieansatz für Krebs entdeckt: Ist ein von Tumoren ausgehendes Signal blockiert, können Immunzellen sie attackieren.

VON GERLINDE FELIX

Zwar hat die Krebstherapie in vielen Bereichen inzwischen eindrucksvolle Fortschritte zu verzeichnen, doch immer noch lassen sich manche Tumorformen kaum oder gar nicht heilen. Um entscheidende Verbesserungen zu erreichen, sind wohl auch grundsätzlich neue Ansätze erforderlich. Irving Weissman und seine Mitarbeiter von der Stanford University konzentrieren sich daher auf ein bestimmtes Protein auf der Oberfläche von menschlichen Krebszellen, genannt CD47. Dieses verhindert nämlich, dass das Immunsystem Tumorzellen als Störenfriede erkennt und vernichtet.

Die Bildung von CD47-Proteinen ist an sich ein normaler Schutzmechanismus von Körperzellen, um sich vor Angriffen durch Fresszellen (Makrophagen) zu schützen. Daher reichern etwa Blutstammzellen, die vorübergehend ihre sichere Nische im Knochenmark verlassen haben und im Blutkreislauf zirkulieren, CD47 auf ihrer Oberfläche an, um nicht attackiert zu werden. Das hatten Weissman und seine Kollegen bereits 2009 herausgefunden *(Cell 138 (2), S. 271–285, 2009)*. Weiterhin erkannten die Forscher, dass bei bestimmten Blutkrebserkrankungen – der myeloischen Leukämie und Lymphomen – die Tumorzellen ebenfalls mehr CD47 aufweisen. Ihre Schlussfolgerung: Krebszellen nutzen diesen Schutzmechanismus, um nicht von Fresszellen vernichtet zu werden. Dabei bindet sich das CD47 kurzzeitig an ein Protein namens SIRPalpha (signalregulatorisches Protein alpha) auf den Makrophagen. Der Kontakt löst in diesen eine Kette biochemischer Reaktionen aus, woraufhin



MIT FRDL. GEN. VON JENS-PETER VOLKMER, UNIVERSITÄT DÜSSELDORF

Antikörper gegen das Oberflächenprotein CD47 halten in Mäuse eingepflanztes menschliches Tumorgewebe in Schach (oben). Ohne die Behandlung würden die Tiere bald dem Krebs zum Opfer fallen (unten). Blau markiert schwaches, rot starkes Tumorwachstum.

die Krebszelle verschont wird. Die Forscher sprechen vom »Don't eat me«-Signal des CD47, das auf die Fresszellen wie ein Stoppzeichen wirkt.

In einer neuen Studie kamen nun Stephan B. Willingham und Jens-Peter Volkmer aus der Arbeitsgruppe von Weissman und Kollegen zu dem Ergebnis, dass sich die meisten menschlichen Krebsarten dieses Tricks bedienen *(PNAS 109(17), S. 6662–6667, 2012)*. »So produzieren nahezu alle Krebszellen das Oberflächenprotein CD47 in einer Menge, die durchschnittlich etwa das Dreifache jener von gesunden Zellen beträgt«, sagt Volkmer. Die Zahl der CD47-Moleküle bestimmten die Forscher mit der so genannten Durchflusszytometrie.

Des Weiteren entnahmen sie Gewebeproben von menschlichen Brust-, Eierstock-, Prostata-, Blasen-, Leber- und Hirntumoren und transplantierten sie in speziell gezüchtete Mäuse, die menschliches Tumorgewebe nicht abstoßen. Ein paar Wochen später injizierten sie dann einen gegen CD47 gerichteten Antikörper in die Tiere. »Der Antikörper dockte bei allen untersuchten Krebsarten an CD47 an und blockierte auf diese Weise das »Don't eat me«-Signal«, so Volkmer. Daraufhin attackierten die Fresszellen die Tumoren. Allerdings zeigte sich, dass Krebszellen zusätzlich noch eine andere Struktur auf ihrer Oberfläche haben müssen, die Makrophagen zum Mahl einlädt. Denn: Wurden die deutlich seltener auftretenden CD47-Proteine auf der Oberfläche gesunder Zellen mit dem Antikörper blockiert, war dies allein noch kein Startsignal für die Fresszellen, sich diese Zellen einzuverleiben.

Bereits Ende 2010 beschrieben Mark Chao und Ravindra Majeti vom Weissman-Team, dass auf Krebszellen nicht nur ein »Don't eat me«-Signal zu finden ist, sondern als Gegenspieler auch ein »Eat me«-Signal: das Oberflächenprotein Calreticulin *(Sci Transl Med 2(63): 63 ra94, 2010)*. Solange CD47 und Calreticulin ihre Signale ungestört senden können, wird eine Krebszelle offenbar nicht gefressen. Ist jedoch von den beiden Proteinen selektiv das CD47 blockiert, attackieren die Immunzellen.

Als Müll markiert

Doch warum sollten Krebszellen überhaupt »Eat me«-Signale aussenden, um sich den Fresszellen als Häppchen anzubieten? Vermutlich hilft Calreticulin normalerweise, beschädigte Zellen zu entfernen. Für diese Annahme spricht, dass gesunde Zellen kein Calreticulin zeigen. Werden sie aber geschädigt, taucht das Protein plötzlich auf ihrer Oberfläche auf. Es scheint die Zelle für Makrophagen als »Müll« zu markieren. »Bei Krebs könnte die Calreticulin-Expression auf der Oberfläche die kranke Zelle dazu anregen, vermehrt CD47-Proteine auszubilden, um eine Phagozytose durch Fresszellen doch noch abzuwenden«, erläutert Mark Chao von der Stanford School of Medicine.

Dass Calreticulin bei gesunden Zellen fehlt, erklärt, warum eine Therapie mit

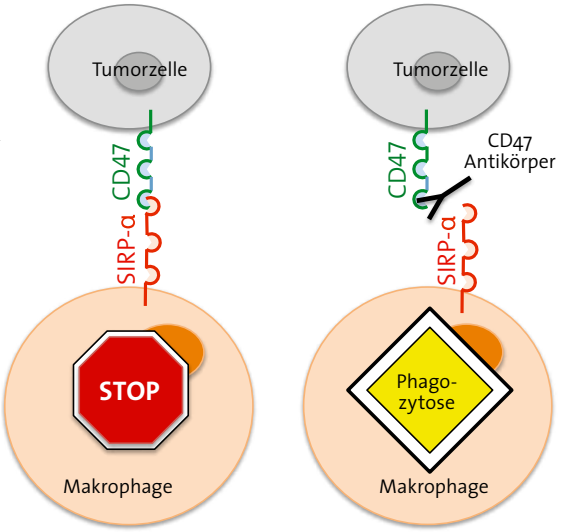
Natur
Energie
Plus

Mit der Natur auf einer Welle.

In den letzten zwölf Monaten haben sich über 30.000 Bürger für Strom aus 100 % Wasserkraft von NaturEnergiePlus entschieden. Wann wechseln Sie zum Strom aus sauberer Quelle?

→ Jetzt wechseln!

www.naturenergieplus.de



MIT FRDL. GEN. VON JENS-PETER VOLKMER, UNIVERSITÄT DÜSSELDORF

CD47 auf der Oberfläche von Tumorzellen bindet sich an SIRP-Alpha auf Fresszellen (Makrophagen), was auf letztere wie ein Stoppsignal wirkt. Verhindert ein Antikörper diese Interaktion, kann die Fresszelle den Krebs ungehindert angreifen.

einem gegen CD47 gerichteten Antikörper nur vergleichsweise wenig schädliche Nebenwirkungen hat, einmal abgesehen von einer vorübergehenden Blutarmut. »Das Blockieren des ›Don't eat me‹-Signals unterdrückte das Wachstum nahezu jedes menschlichen Krebsgewebes in den von uns getesteten Mäusen, mit minimaler Toxizität für den Organismus«, führt Weissman aus.

Innerhalb einiger Wochen nach der Antikörpertherapie schrumpfen die implantierten Tumoren in den Tieren, was Bioluminezenz-Aufnahmen zeigen (siehe Bild S. 15). Abhängig von der Ausgangsgröße des Tumors verschwindet der Krebs entweder ganz oder bildet zumindest keine Tochtergeschwülste mehr. Zirkulierende Krebszellen dürften ebenfalls effektiv beseitigt werden. Die CD47-Antikörpertherapie scheint umso besser zu wirken, je kleiner der Tumor ist und je früher die Therapie beginnt. Allerdings hat bei einigen Mäusen mit implantiertem Brusttumorgewebe der neue Therapieansatz nicht zum erhofften Erfolg geführt. Woran dies liegt, ist bislang unklar.

Die aggressivsten Krebstypen haben übrigens die größte Zahl an Calreticulinmolekülen auf ihrer Oberfläche. Damit sollte die Antikörpertherapie bei diesen auch am durchschlagendsten wirken. Die an der Studie beteiligten Wissenschaftler sind sich ziemlich sicher, dass erste klinische Untersuchungen in ein oder zwei Jahren starten werden. Weissman könnte sich vorstellen, den Tumor vorab mittels Operation oder Radiotherapie zu verkleinern, um die Antikörperbehandlung noch effektiver zu machen. Bei einer Kombination mit Chemotherapie oder antientzündlicher Behandlung sei allerdings Vorsicht geboten, so der Wissenschaftler. Durch den dabei auftretenden Zellstress besteht das Risiko, dass gesunde Zellen plötzlich vermehrt »Eat me«-Signale aussenden – und dann ebenfalls ein Opfer der Fresszellen werden.

Gerlinde Felix ist freie Medizin- und Wissenschaftsjournalistin in Markt Wartenberg.

MUSIKALISCHE RHYTHMEN

Immer haarscharf daneben

Forscher analysieren die geringfügigen Schwankungen in musikalischen Rhythmen mit den Methoden der Statistik. Die so aufgedeckten Gesetzmäßigkeiten erlauben es beispielsweise auch, computergenerierte Musik natürlicher zu gestalten.

VON HOLGER HENNIG, RAGNAR FLEISCHMANN UND THEO GEISEL

Warum klingen Musik und Schlagzeugrhythmen, die von Computern erzeugt werden, manchmal so unnatürlich? Ein Grund dafür liegt im Fehlen der winzigen Ungenauigkeiten, die zu jeder menschlichen Tätigkeit gehören. Egal welcher Musiker spielt: Abweichungen vom exakten Zeitmaß finden sich in jedem einzelnen Schlag eines jeden Taktes. Diese Abweichungen sind zumeist klein, etwa 10 bis 20 Millisekunden. Dies ist kürzer als die Dauer eines Flügelschlags einer Libelle, dennoch kann man den Unterschied hören.

Toningenieuren ist das Phänomen seit Langem bekannt. Sie bauen sogar kleine zufällige Abweichungen in computergenerierte Musikrhythmen ein, um sie natürlicher wirken zu lassen – ein Verfahren, das *Humanizing* (Vermenschlichung) genannt wird. Doch die genauen Eigenschaften solcher Abweichungen, wenn der Mensch komplexe Rhythmen spielt, waren bislang noch nicht untersucht worden. Sind die Variationen von einem Schlag zum nächsten rein zufällig? Oder stehen sie in einer Beziehung, die sich in einem Gesetz erfassen lässt? Um das herauszufinden, haben wir Methoden der Zeitreihenanalyse verwendet, wie sie in der Chaostheorie gebräuchlich sind.

Lassen Sie uns dem menschlichen Taktgefühl anhand eines einfachen musikalischen Experiments nachgehen. Ein professioneller Schlagzeuger

© Hennig, H., Fleischmann, R., Geisel, T.: Musical rhythms - The science of being slightly off. In: Physics Today July 2012, S. 64–65; Abdruck genehmigt von American Institute of Physics, 2012

aus Ghana wurde gut fünf Minuten lang aufgenommen, während er seine Trommelschläge mit einem über Kopfhörer vorgegebenen Metronom synchronisierte. Die mittlere Abweichung des Musikers gegenüber der Vorgabe betrug –16 Millisekunden (Kasten S. 18). Der Schlagzeuger schlug seine Trommel also im Mittel leicht verfrüht, das Klicken des Metronoms vorausahnend.

Ein auffälliges Merkmal im unteren Diagramm im Kasten ist das Auftreten von Trends in der Zeitreihe. Zum Beispiel betragen die Abweichungen der Schläge in den Takten 200 bis 280 im Mittel –29 Millisekunden, deutlich mehr als im Gesamtmittel. Für eine Weile spielte der Schlagzeuger deutlich der Vorgabe voraus. Dagegen neigte er etwa eine halbe Minute (90 Schläge) vorher dazu, leicht hinter dem Metronomklick zu spielen. Offensichtlich treten die Abweichungen keineswegs rein zufällig auf. Erklingt ein bestimmter Schlag vor dem Klicken des Metronoms, dann ist es wahrscheinlich, dass nachfolgende Schläge ebenfalls zu früh kommen. Solche Korrelationen zwischen den Abweichungen können bis zu mehrere Minuten erhalten bleiben. Es scheint, als hätte das Gehirn ein Gedächtnis für zeitliche Abweichungen. Das gilt im Übrigen nicht nur für zeitliche Intervalle: Ein verwandtes Phänomen tritt auch auf, wenn Probanden räumliche Abstände mehrmals möglichst gleichmäßig wiederholen sollen.

Gedächtnis für Rhythmen

Der Einfluss einer Schlagabweichung auf einen nachfolgenden Schlag nimmt ab, je mehr Takte dazwischen liegen. Um dieses Abklingen der Korrelationen zu charakterisieren, zerlegten wir die Zeitreihen, das heißt die zeitlichen Abfolgen der Abweichungen, in eine Summe von Sinus- und Cosinusfunktionen verschiedener Frequenzen und ermittelten daraus die relative Stärke bei jeder Frequenz f, das sogenannte Leistungsspektrum. Diese Methode kann man sich veranschaulichen, indem man sich ein altes analoges Radiogerät vorstellt, dessen Abstimmknopf man langsam durch das gesamte Frequenzband fährt, während man bei jeder Frequenz die Senderstärke notiert.

Im Fall unseres Schlagzeugvirtuosen fanden wir für dieses Leistungsspektrum S, dass es die Form eines Potenzgesetzes, $S \propto 1/f^{\alpha}$ besitzt, wobei α eine dimensionslose Zahl der Größe ungefähr gleich eins ist: $\alpha \approx 1$. Wäre $\alpha = 0$, hätte jede Frequenz die gleiche Intensität. Dann wäre die ursprüngliche Zeitreihe ein »weißes Rauschen«, und alle Signale wären jeweils von früheren Ereignissen vollkommen unabhängig. Für α-Werte zwischen 0 und 1 fällt der Einfluss einer bestimmten Rhythmusabweichung auf einen Schlag, der eine Zeit τ später folgt, ab wie $\tau^{\alpha-1}$ (mathe-

ANZEIGE

ENCOURAGE. empowering people

Stadt – Land – Fluss.
Zukunftsplanung ist ein Muss!

**Mitmachen beim Schülerwettbewerb 2013
in Mathematik, Naturwissenschaften und Technik!**

Die Welt von morgen, wie soll sie aussehen? Wir suchen junge Forscherinnen und Forscher, die mit ihren Ideen zu Nachhaltigkeit, Klima- und Umweltschutz unsere Zukunft mitgestalten wollen.

Teilnehmen können Schülerinnen und Schüler der oberen Jahrgangsstufen in → Deutschland (ab Klasse 10) → Österreich (Oberstufe ab Klasse 6) → der Schweiz (Sekundarstufe II) → sowie der deutschen Auslandsschulen in Europa (ab Klasse 10). Die Besten präsentieren ihre Arbeiten vor Professoren der Partner-Universitäten RWTH Aachen, TU Berlin und TU München.

Gewinnen Sie Geldpreise im Gesamtwert von rund 100.000 Euro!

**Anmeldeschluss zur Teilnahme: 15. November 2012
Einsendeschluss für die Arbeiten: 15. Januar 2013**

www.siemens-stiftung.org/schuelerwettbewerb

SIEMENS | Stiftung

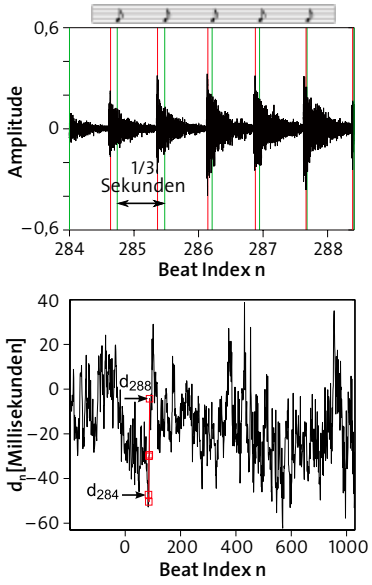


FOTO: AGBENYEGA ATTIOGBE-REDLICH (WWW.HIPPOCRITZ-SCHOOL.COM); MIT FRDL. GEN. VON HOLGER HENNIG; DIAGRAMME: HOLGER HENNIG, RAGNAR FLEISCHMANN UND THEO GEISEL

Gefühl für Rhythmus

Ein professioneller Schlagzeuger schlägt eine Handtrommel, während er einem Metronom folgt. Die obere Grafik zeigt fünf Schläge in einem Ausschnitt von zwei Sekunden: den regulären Metronomrhythmus (grüne Linien) sowie die Schläge des Musikers (rote Linien). In der unteren Grafik sind für 1030 Schläge die Abweichungen d_n vom Metronom aufgezeichnet: Negative (positive) Abweichungen bedeuten Schläge vor (hinter) dem Klick. Der kurze Ausschnitt der oberen Grafik ist in der unteren mit roten Quadraten markiert. Er zeigt, wie der Schlagzeuger von Schlägen vor dem Klick (Beat 284) zu einem Spiel fast auf dem Klick (Beat 288) wechselt.

matisch wird dieser statistische Einfluss beschrieben durch die so genannte Autokorrelationsfunktion, $C(\tau) \propto \tau^{\alpha-1}$). Liegt der Wert von α nahe bei 1, wie bei unserem Schlagzeuger, so schwindet das Gedächtnis also tatsächlich nur sehr langsam; je näher α bei 1 liegt, umso länger bleibt das Gedächtnis erhalten. Das Gleiche gilt übrigens auch für Werte etwas oberhalb von 1. Fachleute sprechen bei α zwischen 0 und 2 von langreichweitigen Korrelationen (Long-range Correlations, kurz LRCs).

Diese treten also auf, wenn ein Schlagzeuger seine Schläge mit dem Metronom synchronisiert. Aber dieses tickt ja nun im denkbar einfachsten Rhythmus, so dass sich die Frage stellt, ob solche Korrelationen auch auftreten, wenn Musiker komplexere Rhythmen spielen, wie etwa in zeitgenössischer Pop- und Rockmusik. Wie sich zeigte, traten die LRCs in allen möglichen komplexen Rhythmen auf, egal ob sie nun mit den Händen, Füßen oder der Stimme erzeugt wurden – so lange die Testperson nicht gänzlich aus dem Takt geraten war *(Hennig, H. et al., PLoS ONE 6, e26457, 2011; http://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0026457)*.

In den 1970er Jahren untersuchten die Physiker Richard Voss und John Clarke von der University of California Tonhöhenschwankungen in verschiedenen Musikstücken (etwa in J. S. Bachs Brandenburgischen Konzerten). Dabei stießen sie ebenfalls auf langreichweitige Korrelationen. Diese liefern einen statistischen Beleg dafür, dass beispielsweise das Ende eines Musikstücks mit vorhergehenden Teilen der Komposition verwoben ist. Dieses Vorhandensein eines melodischen Gedächtnisses leuchtet ein: Während er komponierte, erinnerte sich Bach zweifellos an die Themen und die Entwicklung des gesamten Stückes. Anfang dieses Jahres berichtete zudem der amerikanische Neurowissenschaftler Daniel Levitin, dass er und sein Team LRCs in den Veränderungen der notierten Notenlängen in den Stücken von 40 Komponisten gefunden hätten. Diese und viele weitere Untersuchungen spiegeln die menschliche Vorliebe für eine Balance aus Vorhersagbarkeit und Überraschung in der Musik wider (denn weißes Rauschen kann man als pure Überraschung deuten). Das Gedächtnis, wie es sich in den LRCs abbildet, ist genau richtig, um dieses Gleichgewicht aufrechtzuerhalten.

Was könnte die Ursache unseres Gedächtnisses für Abweichungen von nur wenigen Millisekunden in Musikrhythmen sein? Forscher haben sich schon seit Jahrzehnten mit der Frage beschäftigt, was uns auf einer Zeitskala von Millisekunden ticken lässt, aber die Antwort liegt immer noch weit gehend im Dunkeln. Erstaunlicherweise fehlen LRCs völlig bei solchen Menschen, die beim Musizieren zu häufig den Rhythmus verlieren und mit Hilfe des Metronoms wieder in den Takt finden müssen. Das Fehlen von LRCs könnte seine Ursache im Zurücksetzen des Gedächtnisses in den neurophysiologischen Mechanismen haben, die unser rhythmisches Timing steuern. Es gilt nun, mit weiteren Forschungen die neuronalen Grundlagen aufzuklären, die jene beeindruckende Präzision menschlicher Koordination auf der Zeitskala von Millisekunden ermöglichen. Es gibt dafür verschiedene Modelle, beispielsweise neuronale »Populationsuhren«, in denen sich die Zeit in den dynamischen Aktivitätsmustern eines neuronalen Netzwerks widerspiegelt.

Musik mit menschlicher Note

Wie eingangs erwähnt wirken computergenerierte Rhythmen oft künstlich und roboterhaft. Aus diesem Grund bietet professionelle Audiosoftware die Möglichkeit, mittels einer »Humanizing«-Funktion, künstliche Rhythmusfluktuationen einzubauen. Diese basieren jedoch auf Zufallszahlengeneratoren, die lediglich unkorrelierte Schwankungen erzeugen. Das Resultat ist ein holpriger Ritt: Ein eher ruckeliger, rumpeliger Rhythmus. Toningenieure fügen daher die Abweichungen auch per Hand, nach Gefühl zu den Rhythmen hinzu. Eine Alternative wäre, die mangelnde Perfektion menschlicher Musik zu imitieren, indem LRCs

Gesunde Zähne ohne Umwege.

In FOCUS-GESUNDHEIT bündeln wir die Erfahrung unserer Fachredaktion mit der Kompetenz von Experten.

JETZT AM KIOSK.

FOCUS-GESUNDHEIT gibt es auch unter:
Tel. 0180 5 480 1000*,
Fax 0180 5 480 1001
www.focus-gesundheit.de

*0,14 €/Min. aus dem dt. Festnetz.
Aus dem Mobilnetz max. 0,42 €/Min.

Spezialisten-Liste: Deutschlands Experten für Parodontitis, Wurzelbehandlungen, Kieferorthopädie und Implantate.

Die Wahrheit über Amalgam: Müssen die Quecksilber-Plomben wirklich alle raus?
Zähne richtig pflegen: Was Elektrobürsten, Zahnseide und Mundwässer nützen.

Zähne ersetzen: Wann Implantate nötig sind – und was sie kosten.
Zähne verschönern: Ein strahlend weißes Lächeln mit Bleaching oder Veneers.

Wissen, das hilft. FOCUS GESUNDHEIT

Wie man soziale Netzwerke manipuliert

Über die Einflussnahme per Internet wird schon eifrig geforscht.

Das Internet ist eine feine Sache. An Stelle mehrbändiger Lexika nutze ich Wikipedia, Briefe schreibe ich nur noch per E-Mail, Zeitschriften lese ich online. Zwar komme ich noch ohne Facebook und Twitter aus, höre aber, dass viele Menschen – darunter auch Berufspolitiker – sich ein Leben ohne elektronisches Dauergeplauder gar nicht mehr vorstellen können.

Die Piratenpartei definiert sich geradezu durch solche Netze. Die von ihr anvisierte »Liquid Democracy« lädt im Prinzip jeden ein, sich über das Internet an einer Mischform von direkter und repräsentativer Demokratie zu beteiligen: Wer immer einen Internetanschluss hat, kann wahlweise Anhänger für eigene Anträge werben oder sich einer im Netz bereits vorhandenen Initiative anschließen.

Um politisch unerwünschte Inhalte zu unterdrücken, steht einem autoritären Staat bislang nur der Holzhammer der Zensur zu Gebote – dann bleibt der Bildschirm eben bei gewissen Themen auffallend leer. Doch feinere Mittel sind bereits in Arbeit. Sie beruhen auf der Erforschung von sozialen Netzwerken, sowohl realen als auch elektronischen; dabei liefern letztere die Daten, um erstere zu manipulieren.

Beispielsweise beschreibt Thomas W. Valente von der University of Southern California in Los Angeles ganz allgemein, wie man soziales Verhalten durch »Netzwerk-Interventionen« am besten beeinflusst *(Science 337, S. 49 – 53, 2012)*. Dem Forscher, der am Department of Preventive Medicine arbeitet, geht es zunächst um vorbeugende, gesundheitsfördernde Verhaltensänderungen wie Kondomnutzung oder Impfbereitschaft, also um etwas zweifellos Gutes. Doch die angeführten Tipps und Tricks – Meinungsführer anvisieren, Untergruppen separat bearbeiten, das soziale Netzwerk um passende Neuzugänge erweitern oder es durch Entfernen störender Mitglieder fragmentieren – lassen sich ebenso gut einsetzen, um ein erwünschtes Kaufverhalten zu etablieren oder gegen politische Gegner zu intrigieren. Valente selbst erwähnt als Beispiel außerhalb der Gesundheitsvorsorge nur die Terroristenbekämpfung: Da gelte es, einige Netzteilnehmer in Schlüsselstellungen gezielt auszuschalten, um das Terrornetz insgesamt zu schwächen. Darf man hoffen, dass solche Methoden stets nur der Abwehr echter Gefahren dienen und nicht auch dazu, missliebige Konkurrenten hinterrücks zu erledigen?

Wer soziale Netzwerke manipulieren möchte, will wissen, welche Mitglieder besonderen Einfluss ausüben und welche leicht umzustimmen sind. Diese Frage stellten sich Sinan Aral und Dylan Walker von der Stern School of Business an der New York University *(Science 337, S. 337–341, 2012)*. Ihr Interesse galt der Verbreitung von Meinungen über Konsumgüter durch Mundpropaganda – wobei die »Münder« 1,3 Millionen Facebook-Nutzer waren. Die Resultate dürften nicht nur Werbestrategen interessieren: Jüngere sind leichter zu beeinflussen als Ältere, Frauen überreden eher Männer als andere Frauen, und verheiratete Paare lassen sich besonders schwer etwas andrehen. Außerdem: Einflussreiche Individuen neigen zur Clusterbildung mit ihresgleichen – und nichts übt stärkeren Einfluss aus als solche Pressure-Groups.

So sammelt sich anhand unverfänglicher Studien über Krankheitsprävention und Konsumverhalten allmählich ein Knowhow an, das hinter dem Rücken der Nutzer im Internet eingesetzt werden kann – zum Guten wie zum Schlechten, aber in jedem Fall zur unauffälligen Manipulation eines vermeintlich transparenten Mediums.

Michael Springer

Eingang in die Software fänden. Um zu testen, wie vermenschlichte Computermusik auf Zuhörer wirkt, haben wir zusammen mit einem Tonstudio einen Popsong in zwei unterschiedlichen Versionen aufgenommen – eine mit den üblichen unkorrelierten Fluktuationen, die andere unter Berücksichtigung von LRCs. Befragt, was ihnen nun besser gefallen hätte, gaben die Zuhörer deutlich der zweiten Fassung den Vorzug. Sie, die Leser, können das selbst testen; Audiobeispiele inklusive einiger humanisierter Stücke von J. S. Bach haben wir hier eingestellt: www.nld.ds.mpg.de/~holgerh/gallery.

Wir haben auch eine Online-Umfrage entworfen, siehe www.nld.ds.mpg.de/humanized_audio. Auf diese Weise möchten wir mehr Daten darüber gewinnen, welche Art musikalischer »Fehler« Hörer bevorzugen. Sowohl Nichtmusiker wie auch Profis sind herzlich eingeladen, daran teilzunehmen.

Unsere Beobachtung von langreichweitigen Korrelationen in den von Menschen gespielten Rhythmen ist typisch für einen aktuellen Ansatz in der Physik. Man untersucht dabei komplexe Systeme mit viel Rauschen und einer zunächst wenig fassbaren Struktur. Im Fall der menschlichen Musikrhythmen ist das System nicht nur komplex – es ist ein lebendiger Musiker! Gleichwohl lassen sich dahinter mathematische Gesetze finden, die die dem System zu Grunde liegenden Mechanismen enthüllen. Bei unserem Musiker zeigt ein Potenzgesetz einen Aspekt menschlicher Koordination auf.

Irren ist menschlich. Aber ist das nicht Teil der Komplexität und Schönheit menschlicher Aktivität? Ja – vor allem, wenn der Mensch ein richtig guter Schlagzeuger ist.

Holger Hennig ist Postdoctoral Associate an der Harvard University in Cambridge, Massachusetts. **Ragnar Fleischmann** ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation in Göttingen. **Theo Geisel** ist Direktor am gleichen Institut, Professor für Theoretische Physik an der Universität Göttingen sowie Leiter des Bernstein Center for Computational Neuroscience Göttingen.

herrenhäuser FORUM

Mensch-Natur-Technik

Wie viel kostet ein Regenschauer?
Wer entscheidet über das Klima der Zukunft?
Kann Geo-Engineering unsere Erde retten?

DO 11.10.2012 / 19.00 / HANNOVER

GEO-ENGINEERING –

Wem gehört das Wetter?

MIT **Prof. Dr. Werner Aeschbach-Hertig** Institut für Umweltphysik, Universität Heidelberg, **Prof. Dr. Konrad Ott** Professor für Umweltethik, Universität Greifswald, **Prof. Dr. Ulrich Bathmann** Leibniz-Institut für Ostseeforschung, **Dr. Franz May** Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, **Prof. Dr. Sabine Schlacke** Professorin für Öffentliches Recht, Universität Bremen

MODERIERT VON **Dr. Daniel Lingenhöhl** Redaktionsleiter Spektrum Online

VERANSTALTUNGSORT Kleiner Sendesaal, NDR Funkhaus, Hannover

ANMELDUNG forum@volkswagenstiftung.de

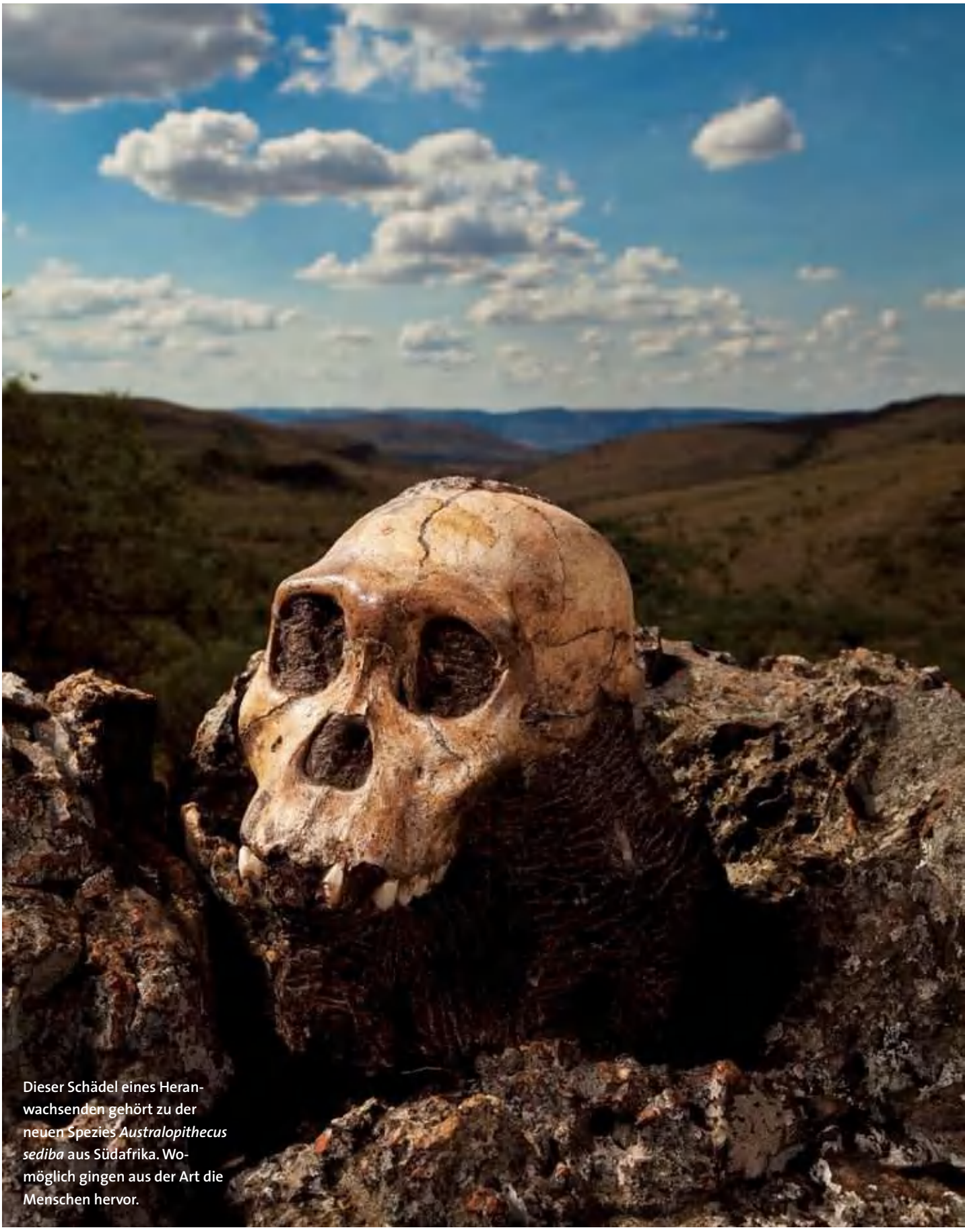
MEHR INFOS www.spektrum.de/mnt

Eine Veranstaltungsreihe von

HERRENHAUSEN

VolkswagenStiftung

Spektrum DER WISSENSCHAFT



Dieser Schädel eines Heranwachsenden gehört zu der neuen Spezies *Australopithecus sediba* aus Südafrika. Womöglich gingen aus der Art die Menschen hervor.

GETTY IMAGES / BRENT STIRTON

MENSCHWERDUNG

Ein neuer Urahn?

Zwei Millionen Jahre alte Skelette aus Südafrika erschüttern das Weltbild der Paläoanthropologen. Über die Bedeutung dieser Überreste aus der Entstehungszeit der Gattung Mensch sind sich die Forscher keineswegs einig – doch der neue Fundort verspricht noch mehr Fossilschätze.

Von Kate Wong

Irgendwann vor zwei bis drei Millionen Jahren bekamen unsere Vorfahren das Aussehen von Menschen. Nach allem, was wir wissen, spielte sich der Übergang in Afrika ab, vermutlich in einer Savannenlandschaft mit weiten Grasfluren, wie sie sich zu der Zeit ausbreiteten. In lichten Wäldern und an Waldrändern hatten damals schon über eine Million Jahre lang ihre Vorgänger gelebt, die Australopithecinen (»Südaffen«) – darunter auch »Lucy« und ihre Verwandtschaft. Diese Hominiden – noch als Vormenschen bezeichnet – besaßen zwar schon einen aufrechten Gang, erinnerten in vielem aber noch deutlich an Menschenaffen. Sie waren kurzbeinig, hatten lange Arme, große, kräftige Kletterhände und ein ziemlich kleines Gehirn. Doch das Klima wurde trockener, die Vegetation offener, und in Anpassung daran brachten sie neue Evolutionslinien hervor. In einer davon entstanden schließlich langbeinige Wesen mit geschickten Händen und einem viel größeren Gehirn: Die Gattung *Homo* trat in Erscheinung.

Seit Jahrzehnten durchkämmen Paläoanthropologen entlegene Winkel Afrikas nach fossilen Überresten der allerersten Menschen und ihrer unmittelbaren Vorgänger. Sie wurden aber nie richtig fündig, abgesehen vielleicht von einem Kieferbruchstück oder ein paar Zähnen hier und da. Denn die meisten entdeckten Knochenfossilien sind entweder zu alt oder zu jung für die entscheidende Übergangsphase. Das heißt, sie gehören zu den älteren Australopithecinen – oder aber schon zu etwas späteren Frühmenschen. Zusammenhängende Skelettteile aus dem Zeitraum von vor rund zwei Millionen Jahren und ein wenig davor fehlten.

Da die bisher ältesten der Gattung *Homo* zugeschriebenen Fossilien aus Ostafrika stammen und dort zudem eine große Anzahl Knochen von *Australopithecus*-Arten gefunden wurden, postulieren viele Forscher seit Langem, dass der Mensch einst in dieser Region entstand. Sie glauben auch, dass jener Urahn mehr Fleisch gegessen haben muss als seine *Australopithecus*-Vorfahren. In einer Umwelt, die immer weniger Früchte und Nüsse lieferte, vermochte er sich damit energiereich zu ernähren. Im Dunkeln liegt allerdings nach wie vor, aus welcher Linie der Australopithecinen sich der Mensch entwickelte und wie der Wandel vonstattengegangen sein mag.

Nun glaubt Lee Berger, Paläoanthropologe an der University of the Witwatersrand in Johannesburg (Südafrika), ein großes Puzzleteil des Rätsels präsentieren zu können. Nach Ansicht von ihm und seinem Forscherteam stellen die seit 2008 ein Stück nördlich der Stadt entdeckten zwei Millionen Jahre alten Hominidenfossilien das herkömmliche Bild vom menschlichen Ursprung womöglich auf den Kopf. Kollegen aus aller Welt reisen an, um die Funde selbst in Augenschein zu nehmen, seit die Forschergruppe 2010 die ersten Arbeiten dazu veröffentlichte.

Gespannt sieht Berger zu, wie sein amerikanischer Gast, Bernard Wood von der George Washington University der US-Hauptstadt Washington, vor vier auf einem Tisch aufgereihten, mit Schaumstoff ausgepolsterten Plastikboxen hin- und hergeht und den Inhalt in Augenschein nimmt. In der ersten Kiste liegen Becken- und Beinknochen, in der nächsten Rippen und Wirbel. Die dritte enthält Armknochen und ein Schlüsselbein, die vierte einen Schädel – alles Überreste desselben Individuums, eines großen Jungen, der schätzungsweise einem heutigen Zwölf- oder Dreizehnjährigen entspräche. Gegenüber stehen mehr Kisten mit Teilen eines zweiten Skeletts, dabei ein Arm und fast alle Knochen der zu-

AUF EINEN BLICK

WIE VERLIEF DER WEG ZUM MENSCHEN?

1 Der **Ursprung der Gattung *Homo*** zählt zu den größten Rätseln der menschlichen Evolution. Viele halten **Ostafrika** für die maßgebliche Region und glauben, dass der *Homo habilis* dort aus der Vormenschenart *Australopithecus afarensis* hervorging.

2 **Neue Fossilien aus Südafrika**, von der Malapa-Höhle bei Johannesburg, stellen das in Frage. Sie stammen direkt aus der Übergangsphase vor zwei Millionen Jahren und zeigen ein **Mosaik alter und neuer Merkmale**.

3 Die Entdecker nannten die neue Art *Australopithecus sediba*. Ob von ihr die **Menschengattung *Homo*** abstammt, ist allerdings heiß umstritten.

gehörigen Hand. Diese Fossilien stammen von einer Frau mittleren Alters (Bild S. 27).

Vor dem Schädel des Jungen mit der nur pampelmusengroßen Hirnschale und den schlanken Zähnen hält Wood schließlich inne, kratzt seinen Bart und beugt sich tiefer hinab. Als er sich wieder aufrichtet, schüttelt er den Kopf und murmelt: »Ich bin selten um Worte verlegen. Aber das hier – wow! Einfach wow!«

Berger grinst. Diese Reaktion kennt er schon von anderen Forscherbesuchen. Seine Mitarbeiter und er ordnen die beiden Skelette einer neuen Art zu, die sie *Australopithecus sediba* nennen (»sediba« heißt in einer einheimischen Sprache »Urquell«). Diese Fossilien vereinen in bisher nicht gekannter Manier Altes und Neues, nämlich Kennzeichen der Gattung *Australopithecus* mit solchen, die schon auf die Gattung *Homo* weisen. Darum mutmaßt das Team, es könne sich tatsächlich um einen unmittelbaren *Homo*-Vorfahren handeln. Zu den herrschenden Vorstellungen passt das alles allerdings ganz und gar nicht.

Ortstermin: Wir fahren auf einer Schotterstraße durch das John-Nash-Reservat 40 Kilometer nordwestlich von Johannesburg, um uns herum Giraffen, Gnus und Warzenschweine. Scheinbar mitten im Nirgendwo hält Berger an und deutet auf eine rechts abbiegende schmalere Piste. 17 Jahre lang ist er hier unzählige Male vorbeigefahren – zur nur wenige Kilometer entfernten Gladysvale-Höhle, in der er damals Ausgrabungen durchführte. Rund acht Kilometer weiter liegen die für ihre Hominidenfossilien berühmten Höhlen von Sterkfontein und Swartkrans, wo auch der Paläontologe Robert Broom (1866–1951) in den 1930er und 1940er Jahren arbeitete.

Für Überraschungen gut: Ein verlassener Steinbruch

Ende der 1940er Jahre hatten zwei amerikanische Paläontologen die Gegend der Gladysvale-Höhle auf Anweisung Brooms in Augenschein genommen. Die beiden Forscher wollten dort nach Fossilien von Früh- und Vormenschen, zusammen Homininen genannt, suchen. Sie fanden aber nichts Interessantes, weswegen sie argwöhnten, man habe sie absichtlich ins Leere laufen lassen.

Berger ahnte nicht, dass ganz in der Nähe ein Sensationsfund zu machen war – nämlich an dieser Piste, einem Fuhrweg zu einem der vielen kleinen Steinbrüche, von denen sich Johannesburg Anfang des 20. Jahrhunderts Baumaterial beschafft hatte.

Zwar hielt es Berger schon zuvor durchaus für möglich, dass die ersten Menschen nicht in Ost-, sondern in Südafrika lebten, denn auch von dort stammen viele wichtige Funde von Australopithecinen, und es kommen immer wieder

ALLE DREI FOTOS: GETTY IMAGES / BRENT STIRTON

neue hinzu. Nur sind aufschlussreiche Fossilien aus jener Zeit so extrem rar, dass er selbst eigentlich nicht mit solch einer Entdeckung rechnete – zumal die Vormenschen dieser Region seit Langem zu Seitenzweigen im Menschenstammbaum gezählt werden. Immerhin bezeichnet die UNESCO die Gegend bei Johannesburg seit 1999 als »Cradle of Humankind« (Wiege der Menschheit) und ernannte die berühmten Höhlen mit ihren vielen bemerkenswerten Hominidenfossilien zum Welterbe. Doch in der Gladysvale-Höhle fand Berger neben vielen Tierfossilien nur einige eher unspektakuläre Stücke von Australopithecinen.

Der Paläoanthropologe und seine Mitarbeiter befassten sich daher damit, das Alter der Höhlenablagerungen genauer zu bestimmen. Die zeitliche Einordnung der südafrikanischen Hominidenfunde befand sich seit jeher im Argen, was ihre Eingliederung in den menschlichen Stammbaum erheblich behinderte. In Ostafrika liegen die Fossilien zwischen Schichten vulkanischer Asche. Weil man deren Alter mit heutigen Messverfahren gut ermitteln kann, lässt sich auch das der Knochen ziemlich exakt eingrenzen. Die Höhlen der »Wiege der Menschheit« bildeten sich dagegen in Dolomitstein, einem Karbonatgestein, das einst aus Korallenriffen eines warmen, flachen Meeres hervorgegangen war. Es gelang Bergers Team, verlässliche Messmethoden zur Altersbestimmung zu finden – was ihm später sehr zupasskommen sollte. Unter anderem verwenden die Forscher für die Gesteine die so genannte Uran-Blei-Datierung, die auf dem radioaktiven Uranzerfall basiert, und kombinieren sie mit Daten von Umpolungen des Erdmagnetfelds. Auch die vielen begleitenden Tierfossilien werden berücksichtigt.

Finderglück dank Sohn und Hund

Am 1. August 2008 fuhr Berger das Naturreservat nach möglichen neuen Fossilstätten ab, die er über »Google Earth« ausgemacht hatte. Diesmal bog er in die erwähnte Piste ein – und kam zu einem ungefähr drei mal vier Meter großen Loch im steinigen Untergrund, das frühere Sprengungen hinterlassen hatten. Als er den Ort kurz inspizierte, sah er einige Tierfossilien. Die Stelle erschien ihm lohnend genug, um wiederzukommen, was er am 15. August tat. Mit von der Partie waren sein neunjähriger Sohn Matthew und ihr Hund. Das Tier lief ins Gebüsch, der Junge hinterher – und ein paar Minuten später hörte der Vater ihn rufen: »Ich habe ein Fossil gefunden!« Gutwillig stapfte Berger hinüber – sicherlich handelte es sich einfach um einen dicken Antilopenknochen. Aber was da im hohen Gras neben einem vom Blitz getroffenen toten Baum aus einem schwärzlichen losen Gesteinsbrocken ragte, war das Ende eines Schlüsselbeins. Berger begriff augenblicklich, dass das Fossil von einem Hominiden herrührte.

Lee Berger (links) und Mitarbeiter Meskack Kgasi in der Malapa-Höhle, dem Fundort der *Australopithecus-sediba*-Skelette. Solche bei früherer Gesteinsgewinnung herausgesprengten Sedimentblöcke voller Fossilien (oben) gibt es in Malapa zuhauf. Zunächst sollen sie auf Knochen hin durchleuchtet werden. Das rechte Bild zeigt das von Tälern durchzogene Gebiet um Malapa bei Johannesburg aus der Luft.

In der Grube selbst, also keine 20 Meter weiter, fanden er und seine Mitarbeiter im Verlauf der nächsten Wochen und Monate noch mehr Skelettteile desselben Individuums: des großen Jungen, der später den Namen »Karabo« (Antwort) erhielt. Und ganz dicht daneben tauchten Stücke eines zweiten Hominidenskeletts auf: jenes der Frau. Bisher hat das Forscherteam über 220 Knochen von *Australopithecus sediba* gefunden – mehr, als es vom frühen *Homo* derzeit insgesamt gibt. Sie stammen offenbar von insgesamt sechs Individuen. Nach dem Lesothowort für Heimstätte nannte Berger die Stelle Malapa. Es gelang auch, das Alter dieser Fossilien bemerkenswert genau zu bestimmen. Sie sind demnach 1,977 Millionen Jahre alt – mit einer Ungenauigkeit von höchstens 2000 Jahren nach oben und unten.

Ein unpassendes Sammelsurium als Herausforderung an die Forscher

Dass von *A. sediba* so viele Skelettelemente vorhanden sind, erlaubt einen einzigartigen Blick auf die Frühzeit der Menschwerdung – und zwar darauf, in welcher Reihenfolge die typisch menschlichen Merkmale entstanden sein könnten. Diese Fossilien besagen nämlich, dass manche der neuen Merkmale nicht zwangsläufig gemeinsam auftraten, anders als bisher vermutet. Beispielsweise glaubten Anthropologen, bestimmte Umgestaltungen der Beckenform würden nicht nur Anpassungen an ein besseres aufrechtes Gehen darstellen, sondern zugleich eng mit der notwendigen Größe des Geburtskanals zusammenhängen, weil die Kinder einen größeren Kopf hatten. Doch *A. sediba* besaß ein in der Form in manchem eher *Homo*-artiges Becken, und dennoch hatte die Art noch ein kleines Gehirn. Mit 420 Kubikzentimetern maß es gerade ein Drittel von unserem.

Auch im Kleinen scheinen manche Merkmalskombinationen nicht recht zueinander zu passen. So ergab die Durchleuchtung des Schädels von dem Jungen trotz des kleinen Gehirns ausgeprägte Strukturen im Stirnhirnbereich, als ob die Hirnrinde stellenweise schon weiter entwickelt war als sonst bei Australopithecinen (siehe Bild S. 30). Das erwachsene weibliche Individuum hatte die langen Arme der baumlebenden Vorfahren, dabei allerdings recht kurze Finger mit einem langen Daumen, die sich vielleicht zum Benutzen und Herstellen von Werkzeug eigneten. Gleichzeitig waren dies den Muskelansätzen zufolge offenbar kräftige Kletterhände. Teilweise verblüfft das Nebeneinander von Alt und Neu derart, dass viele Forscher einzelne Knochen sicherlich verschiedenen Hominidenarten zugeordnet hätten, wären sie nicht im Skelettverbund gefunden worden. Die Füße stellen ebenfalls so ein Mosaik dar: Nach Bernard Zipfel von der University of the Witwatersrand, einem Mitarbeiter des Malapa-Teams, wirkt das Fersenbein von *A. sediba* wie das eines Menschenaffen, das Sprungbein wie das eines Menschen.

Berger meint, die Paläoanthropologen sollten hieraus ihre Lehren ziehen und isoliert gefundene fossile Knochen nicht zu schnell zuordnen. Er wäre selbst in die Irre gegangen – hätte zum Beispiel das Becken von *A. sediba* einem *Homo erectus* zugesprochen, den Arm ohne die Hand einem Menschenaffen, aber das Sprungbein einem modernen Menschen. Seiner Ansicht nach könne man nun zum Beispiel nicht mehr sicher sein, ob etwa ein 2,3 Millionen Jahre alter Oberkiefer, der im äthiopischen Hadar zum Vorschein kam und manchen als eines der ältesten Zeugnisse unserer Gattung *Homo* gilt, wirklich der menschlichen Linie zuzurechnen ist.

Abgesehen von den vereinzelten, wenigen Funden aus derart frühen Phasen, die schon Menschen zugeschrieben werden – so auch ein fast zweieinhalb Millionen Jahre alter Unterkiefer aus Malawi, den Friedemann Schrenk vom Forschungsinstitut Senckenberg und der Universität Frankfurt fand –, wären die neuen südafrikanischen Fossilien einerseits älter als alle anderen gut datierten *Homo*-Überreste, zugleich aber jünger als die Fossilien von *Australopithecus afarensis*. Unter den Anwärtern auf den unmittelbaren *Homo*-Vorfahren stünde *A. sediba* laut Bergers Team in dem Fall ganz vorn. Landläufig gilt derzeit die ostafrikanische Art *A. afarensis* als Stammform des *Homo habilis*, aus dem dann der *Homo erectus* hervorgegangen sein soll – der heute nach einer anderen systematischen Einteilung als *Homo ergaster* bezeichnet wird. Die Forscher um Berger halten es dagegen für möglich, dass *A. sediba* mit seinen teilweise fortschrittlichen Merkmalen in der Evolutionslinie zum *Homo erectus* / *ergaster* stand. *A. sediba* wiederum könnte von der südafrikanischen Art *A. africanus* abstammen. Falls dieses Szenario zuträfe, würde der *Homo habilis* in einen Seitenzweig verwiesen (siehe Grafik S. 28/29).

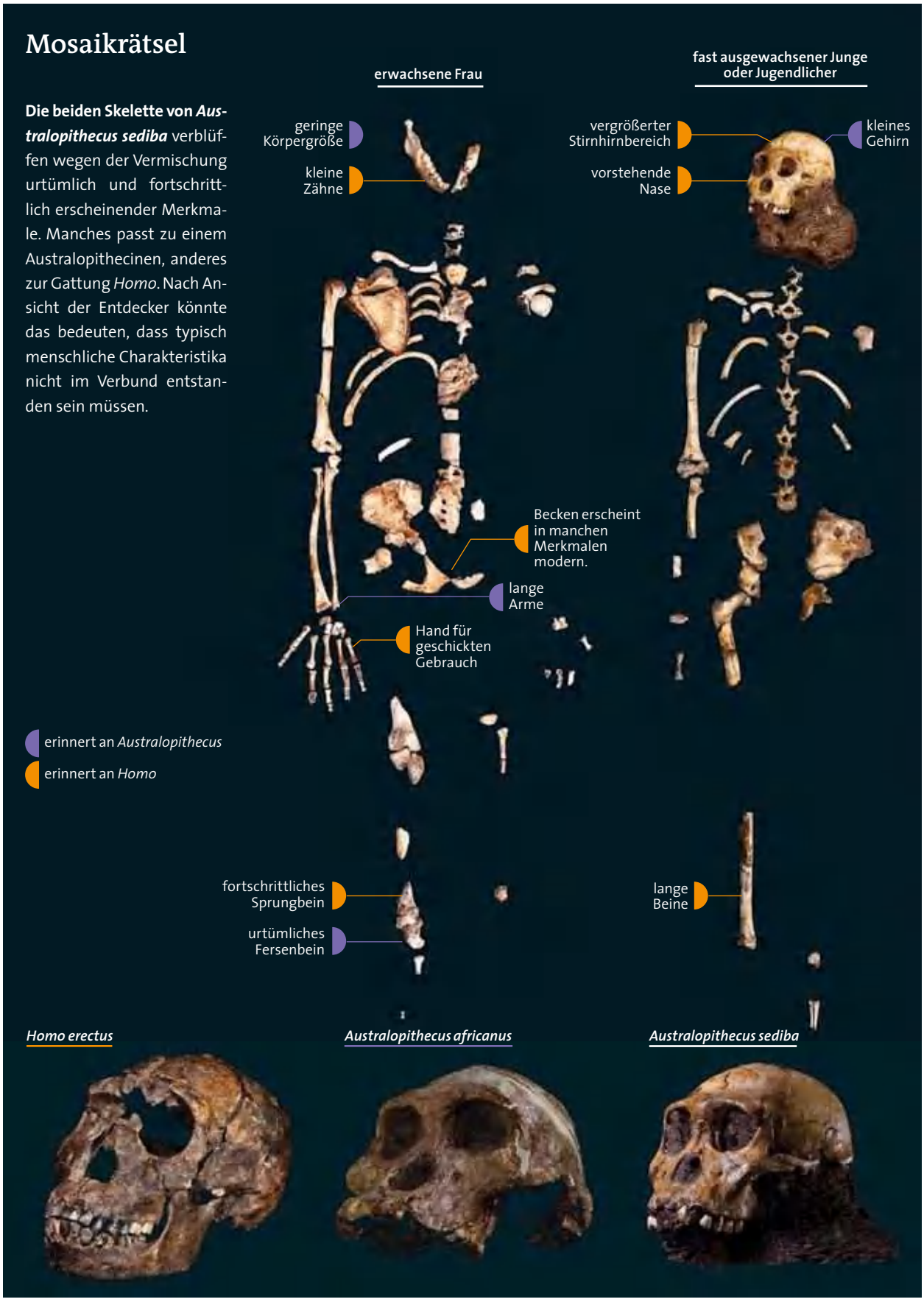
Unter Umständen verlöre sogar *A. afarensis* die ihm bisher zugewiesene zentrale Stellung als Ahn aller späteren Vormenschen – einschließlich *A. africanus* – sowie des Menschen. Berger hebt hervor, dass die Ferse von *A. sediba* ursprünglicher gebaut war als die von *A. afarensis*. Das mag eine Rückentwicklung gewesen sein. Genauso gut aber könnte dieses Merkmal die Herkunft aus einer anderen, noch nicht entdeckten Evolutionslinie bezeugen, zu der weder *A. afarensis* noch *A. africanus* gehörten.

»Wo ich herkomme, heißt es: Man tanzt mit dem Mädchen, das man mitgebracht hat«, witzelt Berger, der in den USA auf einer Farm in Georgia aufwuchs. »Das machen im Grunde Forscher nicht anders.« Viele würden die Herkunft des Menschen von den ostafrikanischen Fossilien herzuleiten versuchen, einfach weil sie die haben und dort arbeiten. Vor diesem Hintergrund galten bislang die ältesten Fossilien aus Südafrika als Zeugnisse eines eigenen, fehlgeschlagenen Evolutionsexperiments. Nun aber, so Berger, könnte sich das Geschehen ganz anders darstellen.

Solche Ideen weist William Kimbel von der Arizona State University in Tempe bei Phoenix vehement zurück. Unter seiner Leitung fanden Forscher in Äthiopien den erwähnten 2,3 Millionen Jahre alten Oberkiefer. Kimbel hält es für unsinnig, dass man ein Fundstück nur im Zusammenhang mit einem Skelett korrekt klassifizieren könne. Es genüge, wenn das Fossil selbst aussagekräftige Merkmale habe. Der Hadar-Kiefer stamme eindeutig von einem Vertreter der Menschen-

Mosaikrätsel

Die beiden Skelette von *Australopithecus sediba* verblüffen wegen der Vermischung urtümlich und fortschrittlich erscheinender Merkmale. Manches passt zu einem Australopithecinen, anderes zur Gattung *Homo*. Nach Ansicht der Entdecker könnte das bedeuten, dass typisch menschliche Charakteristika nicht im Verbund entstanden sein müssen.



GETTY IMAGES / BRENT STIRTON

gattung, was unter anderem die Parabelform der Zahnreihen beweise. Kimbel hat die Malapa-Fossilien gesehen, allerdings nicht eingehend untersucht. Deren menschenähnliche Merkmale findet er zwar faszinierend, weiß sich aber noch keinen Reim darauf zu machen. Dass dies ein *Homo-erectus*-Vorfahr gewesen sein soll, lehnt er entschieden ab. Nur weil ein Taxon einige wenige, scheinbar passende anatomische Besonderheiten zeige, dürfe man es nicht gleich für die Menschenevolution bemühen – zumal einige Fossilien aus Ostafrika mehrere hunderttausend Jahre älter seien und schon eindeutig der Gattung *Homo* zugeordnet werden können.

Doch zu primitiv für einen Kandidaten?

Mit dieser Kritik steht Kimbel nicht allein. »Zu vieles passt einfach nicht zusammen, vor allem nicht Zeit und Ort«, kommentiert etwa Meave Leakey vom Turkana Basin Institute in Kenia, die an ostafrikanischen Fossilien forscht und selbst schon bedeutende Funde gemacht hat. Viel wahrscheinlicher stellten die südafrikanischen Hominiden eine separate Formengruppe mit eigener lokaler Geschichte dar.

René Bobe von der George Washington University stört sich ebenfalls am zu jungen Alter der Malapa-Fossilien. Seines Erachtens wäre *A. sediba* als Menschenvorfahr in Betracht gekommen, hätte die Art eine halbe Million Jahre früher gelebt. Doch für die Zeit vor gerade einmal zwei Millionen Jahren seien diese Primaten im Ganzen einfach noch zu primitiv gewesen, als dass von ihnen jene kaum jüngeren Hominiden vom Turkanasee in Kenia hätten abstammen können, deren Fossilien viel mehr eindeutig menschliche Züge aufweisen. Auch Bobe kritisiert, dass die Forscher zu bereitwillig ihre eigenen Fossilien ins Zentrum stellen. Nur meint er damit seine Johannesburger Kollegen.

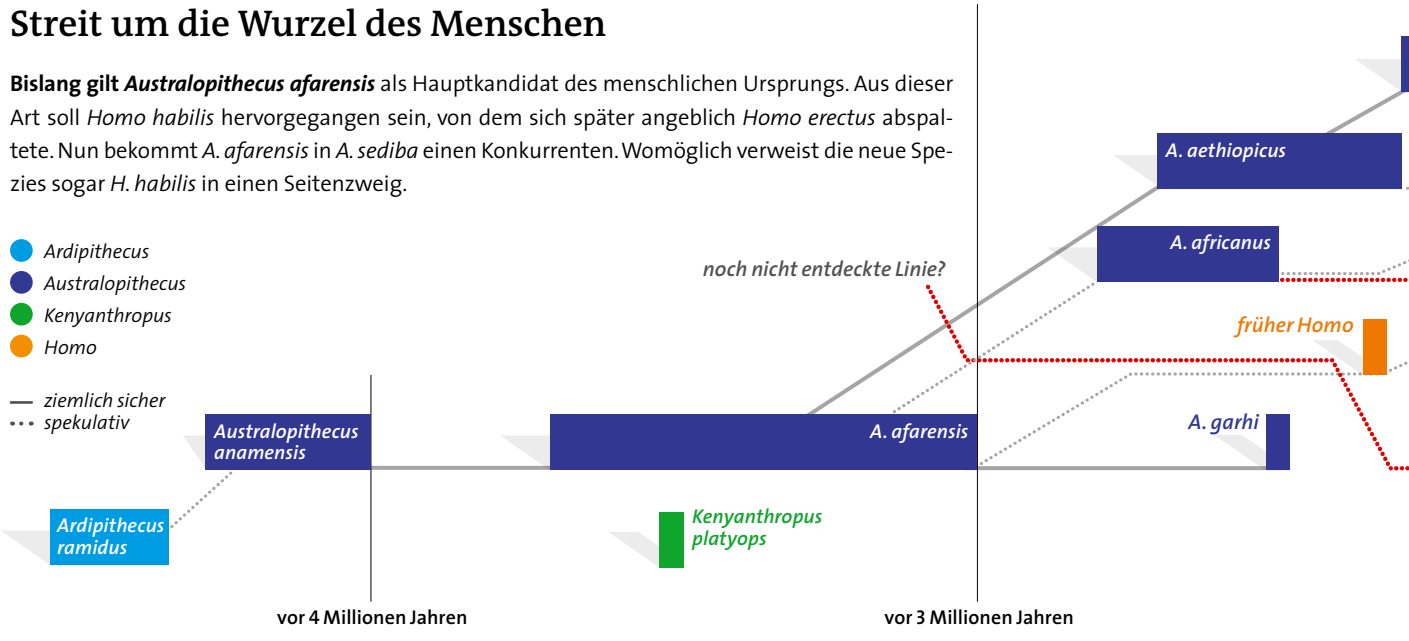
Bernard Wood stimmt Berger in einem Punkt zu: Von den *A.-sediba*-Fossilien könne man lernen, dass sich anhand einer einzelnen Knochenpartie nicht auf das Aussehen des übrigen Körpers schließen lässt. Offenbar seien in der Hominidenevolution mehr Merkmalskombinationen vorgekommen als bisher bekannt. Allerdings hält auch Wood die neue Art nicht für einen Menschenvorfahren. Die paar Kennzeichen, die dafür sprechen könnten, mögen unabhängig in einer eigenen Evolutionslinie aufgetreten sein. Denn *A. sediba* hätte sich viel zu sehr anstrengen müssen, um einen *Homo erectus* hervorzubringen.

Die Einordnung der neuen Art in den Stammbaum wird dadurch erschwert, dass eine unanfechtbare Definition der Gattung *Homo* bisher nicht existiert: also eine Charakterisierung der entscheidenden anatomischen Kennzeichen, in denen frühe Menschen anders waren als Australopithecinen. Hierüber Klarheit zu gewinnen, ist deswegen so problematisch, weil es von der Übergangsphase allzu wenig Fossilien gibt, und die meisten davon sind zudem nur Bruchstücke. Gerade darum bestehen für die ziemlich vollständigen Skelette von Malapa nicht ausreichend Vergleichsmöglichkeiten. »Vielleicht zwingt uns nun *A. sediba* zu einer Definition«, meint Berger.

Wie auch immer – die neuen südafrikanischen Funde erscheinen geeignet, die bisher genauesten Vorstellungen von einem Hominiden aus der Frühzeit der Menschenevolution zu liefern, schon weil Forscher in Malapa gleich von einem halben Dutzend Individuen Fossilien geborgen haben und eine Reihe weiterer zu finden erwarten. Am vollständigsten sind derzeit die beiden erwähnten Skelette eines männlichen Jugendlichen und einer Frau, aber außerdem fanden sich wie gesagt Überreste von vier weiteren Individuen, darunter sogar welche von einem kleinen Kind.

Streit um die Wurzel des Menschen

Bislang gilt *Australopithecus afarensis* als Hauptkandidat des menschlichen Ursprungs. Aus dieser Art soll *Homo habilis* hervorgegangen sein, von dem sich später angeblich *Homo erectus* abspaltete. Nun bekommt *A. afarensis* in *A. sediba* einen Konkurrenten. Womöglich verweist die neue Spezies sogar *H. habilis* in einen Seitenzweig.



Nur äußerst selten stoßen Paläoanthropologen gleich auf mehrere Vertreter derselben Population. Überdies sind die Fossilien ungewöhnlich gut erhalten, selbst manche besonders zarten Knochen, die sonst eigentlich nie überdauern: etwa ein hauchfeines Schulterblatt, eine spandünne erste Rippe, erbsenkleine Fingerknöchel, Wirbel mit intakten Dornfortsätzen.

Etliche Knochen gibt es nun erstmals als Ganzes und im Verbund mit anderen. Zum Beispiel stand den Forschern noch nie ein komplettes vormenschliches Armskelett zur Verfügung, nicht einmal von der berühmten »Lucy«. Die Rückschlüsse über ihre Fortbewegungsweise beruhen auf Schätzungen, denn wichtige Abschnitte ihrer Arm- und Beinknochen fehlen. Von der Malapa-Frau existiert dagegen eine ganze Vorderextremität samt Schulterblatt und Hand, nur ein paar Knöchelchen vom Handgelenk und das letzte Glied von mehreren Fingern fehlen. Berger erwartet, dass viele der vermissten Stücke sowie die restlichen Skelettteile noch auftauchen werden, wenn die eigentlichen systematischen Grabungen beginnen und auch das Innere der eingesammelten Gesteinsbrocken untersucht wird.

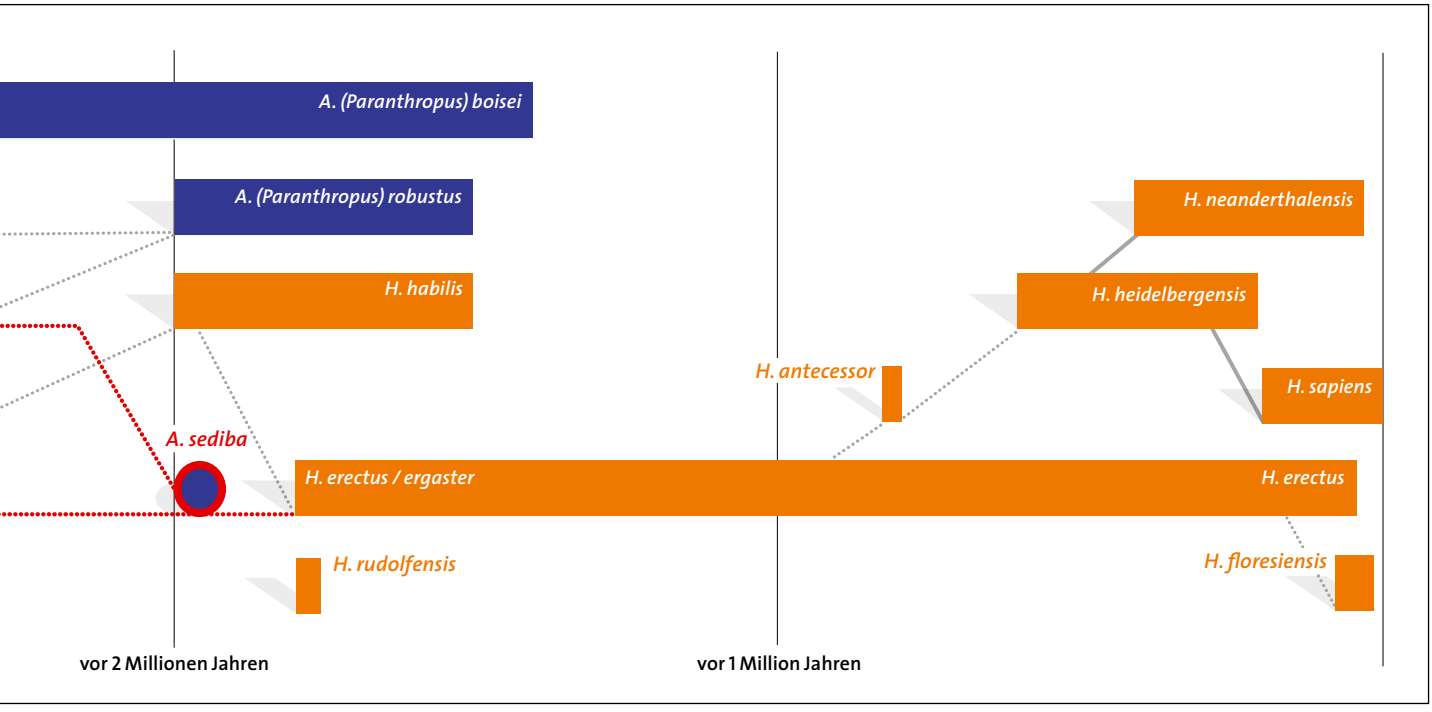
Denn bisher hat das Team lediglich aus Gesteinsoberflächen herausragende Fossilien frei gelegt. Von dem Gesamtmaterial erhoffen sich die Forscher Aufschluss über vielerlei, vom Wachstum der Kinder und ihrer Reifung über die Fortbewegungsarten in ihrem Lebensraum bis hin zur individuellen Variabilität. Anscheinend sind die Erwartungen der Forscher nicht übertrieben: In diesem Juli verlautete, dass ein jetzt durchleuchteter Gesteinsbrocken Skeletteile zu enthalten scheint, die mutmaßlich ebenfalls zu dem Jungen gehören.

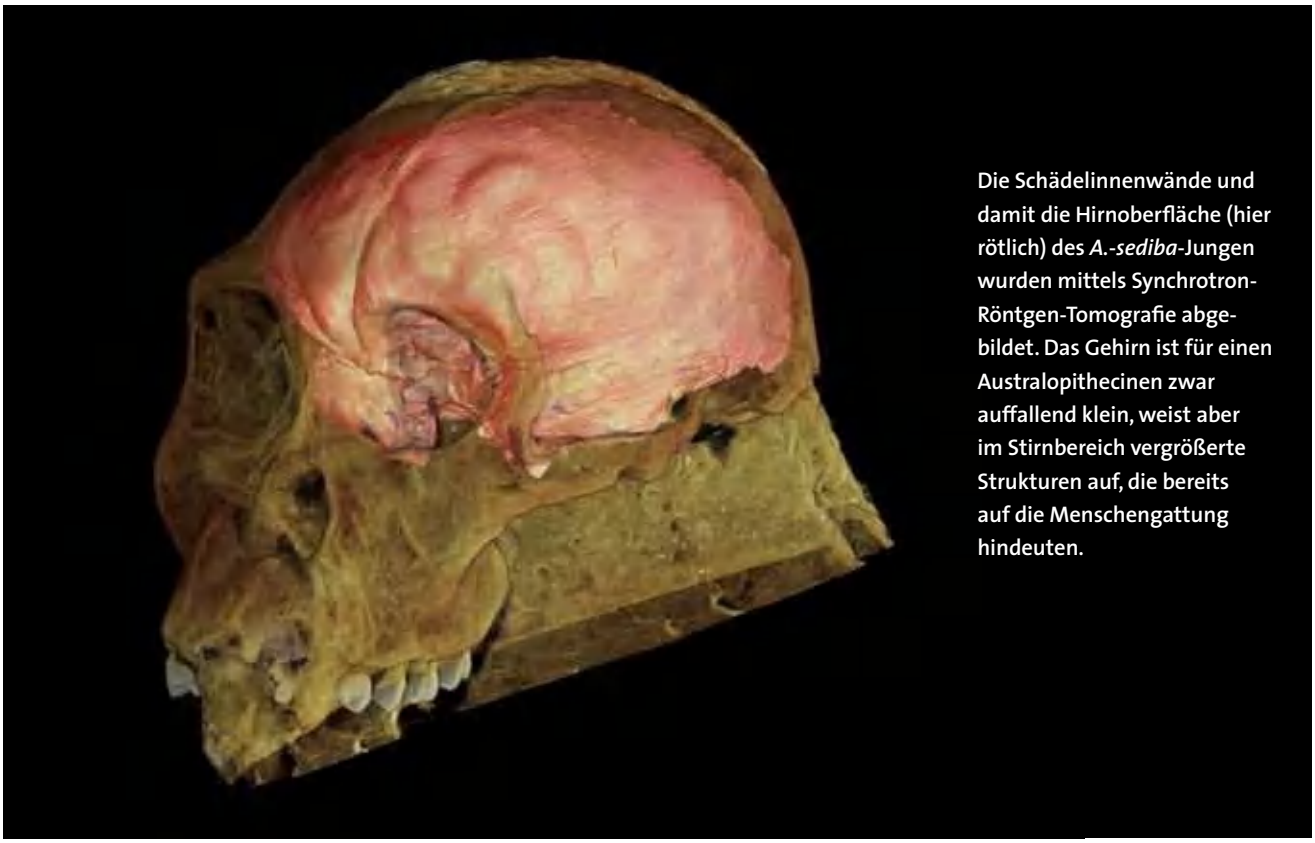
Womöglich halten die Funde sogar noch mehr bereit als versteinerte Knochen, nämlich Überreste von Fleisch und Blut. So etwas hielten Paläoanthropologen früher für unmöglich. Sie glaubten, dass außer den mineralisierten Knochen, die mit der Zeit fossilisieren, alles übrige organische Material – wie Haare, Haut und innere Organe – bald spurlos verschwindet. Doch auf einem Computertomogramm vom Schädel des Jungen fiel Berger oben am Kopf ein schmaler scheinbarer Hohlraum zwischen der Oberfläche des Fossils und der tatsächlichen Knochenkontur auf. Unter dem Mikroskop erinnert die Stelle an Strukturen von Haut. Eingehende Untersuchungen sollen das nun klären. Am Kinn der Frau gibt es etwas Ähnliches, ebenso an manchen Antilopenknochen vom Fundort.

Auf der Suche nach Haut und Haar

Im Idealfall ließen sich Haut- und Haarfarbe dieser späten Vormenschen ermitteln und sogar Dichte und Verteilung ihrer Behaarung sowie der Schweißdrüsen. Daraus könnte man erschließen, ob diese Primaten stark genug schwitzen konnten, um längere Strecken oder bei Hitze zu rennen. Eine gute Herabregulierung der Körpertemperatur war in der Menschenevolution eine wichtige Voraussetzung für ein großes Gehirn, weil dieses Organ nicht zu warm werden darf.

Sollten sich tatsächlich noch Reste organischen Materials finden, lassen sich womöglich sogar DNA-Spuren entdecken. Die bisher ältesten sequenzierten Erbsequenzen von Hominiden stammen aus 100 000 Jahre alten Neandertalerknochen. Die Malapa-Fossilien sind zwar wesentlich älter, aber wegen ihres guten Zustands hegt Berger einige Hoffnung, dass sich DNA-Fragmente erhalten haben. Die Forscher fragen sich, ob die beiden Skelette zu Mutter und Sohn gehören und ob auch die anderen Individuen in näheren Verwandtschaftsbezie-





Die Schädelinnenwände und damit die Hirnoberfläche (hier rötlich) des *A.-sediba*-Jungen wurden mittels Synchrotron-Röntgen-Tomografie abgebildet. Das Gehirn ist für einen Australopithecinen zwar auffallend klein, weist aber im Stirnbereich vergrößerte Strukturen auf, die bereits auf die Menschengattung hindeuten.

MIT FRDL. GEN. VON PAUL TAFFOREAU, ESRF

hungen standen. Ein Erfolg mit solchen Studien würde sicherlich die gesamte Wissenschaftlerszene anregen, Funde aus anderen Regionen daraufhin zu untersuchen. Das langfristige Ziel wäre, die stammesgeschichtlichen Beziehungen der einzelnen Hominidenarten genetisch abzuklären.

Ganz unsinnig sind solche Ideen nicht – auch wenn es sehr stichhaltiger Beweise bedürfen wird, um die Fachwelt davon zu überzeugen, dass mehrere Millionen Jahre alte Fossilien noch organische Reste aufweisen können. Für die *A.-sediba*-Funde verlaufen die bisherigen Untersuchungen viel versprechend. Und schließlich glauben andere Forscher, bei mit 67 und 80 Millionen Jahren noch wesentlich älteren Dinosaurierknochen Hinweise auf organische Strukturen gefunden zu haben (siehe »Blutspuren aus der Kreidezeit«, Spektrum der Wissenschaft 6/2011, S. 32). Berger hält es sogar für möglich, dass bei vor- und frühmenschlichen Fossilien noch ziemlich oft organische Reste erhalten sind. Auf den Gedanken sei bislang nur noch niemand gekommen.

Ebenso wenig haben sich Paläoanthropologen bis vor Kurzem für Zahnstein interessiert. Auf den Backenzähnen des Jungen von Malapa sitzen dunkle bräunliche Flecken. Präparatoren pflegen solche Ablagerungen zu entfernen, wenn sie Fossilien für wissenschaftliche Analysen aufbereiten. Doch Berger fragte sich, ob dies die gleiche Substanz ist wie bei uns – und ob sie etwas über die Ernährung damals erzählen könnte. Denn im Zahnstein, der aus Zahnbelag und Kalziumeinlagerungen aus Speichel entsteht, stecken winzigste im Mund verbliebene Essensreste – wie die Anthropologin Amanda Henry kürzlich an Neandertalerzähnen nachwies. Inzwischen hat sie sich am Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig Zähne von *A. sediba* vorgenommen.

Für molekulare Untersuchungen zur Ernährungsweise einer Art und zu ihren Veränderungen während der Menschenevolution musste bisher oft das Zahnmaterial selbst herhalten. So liefert das Verhältnis zweier stabiler Kohlenstoffisotope im Zahnschmelz Hinweise, welche von zwei Pflanzenkategorien jemand vorwiegend verzehrt hat, beziehungsweise wie sich gegessene Tiere ernährten. Die so genannten C3-Pflanzen betreiben in Anpassung an den Lebensraum eine andere Art der Fotosynthese als die C4-Pflanzen, was sich in den angereicherten Kohlenstoffisotopen niederschlägt.

Zur ersten Kategorie gehören grob gesagt viele Blatt- und Früchte tragende Arten der Wälder und feuchterer Standorte. C4-Pflanzen sind allgemein recht trocken- und hitzeresistent. Zu ihnen zählen in den Tropen insbesondere widerstandsfähige Gräser. Nach neueren Zusammenstellungen ernährten sich die einzelnen Vormenschenarten offenbar unterschiedlicher als bisher angenommen. Die sehr frühe Spezies *Ardipithecus ramidus* fraß demnach ähnliche, eher weiche Nahrung von C3-Pflanzen wie Savannenschimpansen. Andere Arten verzehrten anscheinend auch Gräser aus der Gruppe der C4-Pflanzen. Die spezialisierte Art *Paranthropus robustus* nahm sogar fast nur C4-Pflanzen zu sich.

Zahnstein kann, zusammen mit Abnutzungsspuren vom Kauen, noch einige direktere Anhaltspunkte zum Speiseplan

der letzten Zeit liefern. Pflanzen bilden winzige Siliziumkristalle, von Paläontologen Phytolithen genannt, mit oft charakteristischem Aussehen, die sich im Zahnstein erhalten können. Henry und ihre Kollegen stellten nun fest, dass die Hominiden von Malapa erstaunlicherweise fast nur C3-Pflanzen gegessen hatten, davon allerdings ein reiches Spektrum. Vermutlich verzehrten sie sowohl Blätter und Früchte als auch Holz oder Rinde. Es fragt sich, wie sich dieser eher »unmodern« erscheinende Speiseplan mit ihrem Körperbau, ihrem Fortbewegungstalent und den vermutlich recht geschickten Händen vereinbarte.

Die letzten Lebenstage der Malapa-Primaten waren möglicherweise dramatisch. Berger und seine Mitarbeiter spekulieren, dass sie auf der verzweifelten Suche nach Wasser den steilen Eingang der Höhle hinabzuklettern versuchten, deren Grund damals 30 bis 50 Meter tiefer gelegen haben dürfte als heute, und dabei abrutschten. Das gleiche Schicksal ereilte damals Antilopen, Zebras und diverse andere Tiere. Irgendwann wurden die vielen Kadaver dann unter Schlammmassen begraben, die durch die Höhle trieben.

Evolutionsschübe durch Umkehr des Magnetfelds?

Vielleicht hat es etwas zu besagen, dass sie alle gerade zur selben Zeit ins Verderben stürzten, als sich das Erdmagnetfeld umpolte. Über die Hintergründe von solchen Umkehrereignissen wissen die Forscher wenig. Die Frage ist, ob und in welchem Ausmaß sie Umweltveränderungen bewirken – bis hin zu ökologischen Katastrophen. Zugleich könnten solche Zeiten Evolutionsschübe auslösen. Das Erdmagnetfeld schirmt unseren Planeten gegen den Sonnenwind ab, also einen Strom geladener Teilchen, sowie gegen kosmische Teilchenstrahlung. Solche Strahlungen sind für Organismen sehr schädlich und bringen oft Mutationen mit sich. Des Weiteren sollte eine Umpolung Tiere massiv irritieren, die bei ihren Wanderungen das Magnetfeld nutzen. Malapa gehört zu den wenigen Orten, wo eine magnetische Umkehr mit reichen Fossilfunden einhergeht. Deren weitere Untersuchung könnte sich somit schon aus diesem Grund lohnen.

Unter den Huftierkadavern von Malapa befand sich eine trächtige Antilope. Gewöhnlich bekommen diese Tiere ihre Jungen innerhalb einer sehr kurzen Phase im Frühling. Aus dem Entwicklungsstand des Fetus möchten die Forscher nun schließen, in welcher Jahreszeit die Hominiden den Tod fanden. An deren Knochen finden sich auch Spuren von Maden und Aaskäfern. Sie sollen zeigen, wie lange die Leichen der Vormenschen noch frei dalagen, bevor Schlamm sie zudeckte.

Eigentlich hat die Beschäftigung mit *Australopithecus sedib*a gerade erst angefangen. »Sie trampeln hier alle auf Hominidenfossilien herum«, erklärt Berger der Besuchergruppe, die an einem Spätfrühlingstag Ende November nach Malapa gekommen ist und nun auf dem steinigen Gelände zwischen dem Grubenrand und dem Baum herumsteht, wo der Brocken mit dem ersten Fossil lag. Dann klettert der Forscher in das Loch hinein und zeigt auf Knochen, die überall aus dem Gestein ragen und quasi auf ihre Bergung warten. Ehrfürchtig und fasziniert versuchen alle einen Blick zu erhaschen – auf den Armknochen eines Kleinkinds, den Unterkiefer einer Raubkatze, die Stelle im Fels, wo weitere Skelettteile des »Karabo« getauften Jugendlichen vermutet werden.

Es klingt unglaublich, aber bis dahin hat das Team nur gesammelt, was vor 100 Jahren Bergwerksarbeiten oder später Regengüsse zu Tage gebracht hatten. Systematische Ausgrabungen des etwa 500 Quadratmeter großen Terrains versprechen deswegen noch viel mehr Ausbeute. Eine Abdeckkonstruktion soll die Fläche schützen und zugleich als hochmoderne Feldstation dienen. Derweil stapeln sich in einem Raum der Universität in Johannesburg die einst von Bergarbeitern herausgesprengten Felsbrocken in Regalen bis zur Decke. Sie sollen mit Computertomografie nach Fossilien durchleuchtet werden. Zum Beispiel müsste in einem davon der Schädel des weiblichen Skeletts stecken.

Als hätte Berger mit Malapa nicht für den Rest seines Lebens mehr als genug zu tun, schmiedet er neue Pläne. *A. sediba* »hat gezeigt, dass wir wirklich einen besseren Fundus an Fossilien brauchen«, sinniert er. Mit der Google-Earth-Kartierung stieß er damals in der »Cradle of Humankind« allein auf über drei Dutzend neue Fossilstätten, die möglicherweise Hominidenspuren bergen. Die vielversprechendsten von ihnen sollen Paläontologen nun ergründen. Aber auch anderswo, etwa in Angola und im Kongo, gebe es ähnliche Höhlen – für Evolutionsanthropologen bisher Terra incognita.

DIE AUTORIN

Kate Wong ist langjährige Redakteurin bei »Scientific American«. Sie verfasste für die Zeitschrift schon mehrere Überblicksartikel zur Evolution des Menschen.

QUELLEN

Berger, L. R. et al.: *Australopithecus sediba*: A New Species of *Homo*-like Australopith from South Africa. In: Science 328, S.195–204, 2010

Henry, A. G. et al.: The Diet of *Australopithecis sediba*. In: Nature 487, S. 90–93, 2012

Kivell, T. L. et al.: *Australopithecus sediba* Hand Demonstrates Mosaic Evolution of Locomotor and Manipulative Abilities. In: Science 333, S. 1411–1417, 2011

LITERATURTIPP

Schrenk, F.: Die Frühzeit des Menschen. Der Weg zum Homo sapiens. C.H.Beck Wissen, München, 5., vollständig neubearbeitete und ergänzte Auflage 2008
Gut verständliche Darstellung der Menschenevolution eines Experten

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1157690**

Patient im Selbstversuch

Der kanadische Immunologe Ralph Marvin Steinman unternahm bahnbrechende Forschungen zur körpereigenen Abwehr. Als Ärzte bei ihm einen Bauchspeicheldrüsenkrebs diagnostiziert hatten, entschloss er sich 2007 zu einem radikalen Schritt: Er testete seine Thesen zur Tumorimmuntherapie an sich selbst. Steinman überlebte deutlich länger als erwartet – und starb drei Tage, bevor er den Nobelpreis zuerkannt bekam.

Von Katherine Harmon

In den frühen 1970er Jahren arbeitete Steinman als Wissenschaftler an der Rockefeller University in Manhattan, New York City. Eines Tages sah er etwas durchs Mikroskop, das noch niemand zuvor beschrieben hatte: eigenartige Zellen mit verzweigten, spindelförmigen Fortsätzen. Man kannte damals schon wichtige Akteure des Immunsystems, etwa die B-Zellen, die körperfremde Eindringlinge erkennen helfen, sowie die T-Zellen, die solche Invasoren angreifen. Unklar war jedoch, was genau die B- und T-Zellen – beide gehören zu den weißen Blutkörperchen – in Aktion versetzt. Steinman vermutete, dass seine neu entdeckten Zellen diese Funktion ausüben könnten.

Er sollte Recht behalten. Die dendritischen Zellen, wie er sie nannte, spielen nach heutigem Kenntnisstand eine entscheidende Rolle beim Aufspüren körperfremder Strukturen und beim Auslösen von Immunreaktionen dagegen. Sie fangen fremde Zellen und Partikel mit ihren armähnlichen Fortsätzen ein, nehmen sie in sich auf, verarbeiten sie und präsentieren Teile davon auf ihrer Oberfläche den anderen Immunzellen. So bringen sie den »Kampftruppen« der Körperabwehr bei, welches Ziel angegriffen werden soll. Diese Entdeckung war ein Meilenstein der Immunologie. Sie konnte erstmals detailliert erklären, wie Impfstoffe funktionieren, und machte Steinman zu einem führenden Forscher auf seinem Gebiet. Aber nicht nur für die Wissenschaft erwies sie sich als folgenreich, sondern auch für ihn persönlich.

Im Lauf der folgenden Jahre kam Steinman zu der Überzeugung, dass dendritische Zellen sich gegen Krankheiten wie Krebs und Aids einsetzen lassen – etwa, indem man sie mit Tumorbestandteilen beladt, so dass sie die Immunabwehr auf die Geschwulst lenken. Gemeinsam mit seinen internationalen Forscherkollegen war er auf dem besten Weg, diese These zu belegen, als sein Leben eine unerwartete Wende nahm. Im März 2007 stellten Ärzte bei ihm Bauchspeicheldrüsenkrebs fest. Dieser aggressiven Tumorerkrankung erliegen vier von fünf Patienten binnen eines Jahres nach der Diagnose. Steinman jedoch starb erst viereinhalb Jahre später daran, im September 2011 – und hatte somit deutlich länger überlebt, als zu erwarten gewesen war. Wahrscheinlich ist das darauf zurückzuführen, dass er seine Forschungen zur Krebsimmuntherapie an sich selbst angewendet hatte, wobei ihm Freunde und Kollegen halfen. Es mutet wie höhere Fügung an, dass er gerade lange genug lebte, um noch für den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin nominiert zu werden. Weil er nur drei Tage vor der Preisverleihung starb, erhielt die Nobelversammlung nicht rechtzeitig Kenntnis davon, so dass sie ihm – eigentlich entgegen den Statuten – die Auszeichnung posthum zuerkannte.

Als Steinman in jungen Jahren sein Biologie- und Chemiestudium an der McGill University in Montreal antrat, hatte er sich noch kaum mit Biologie beschäftigt. Doch bald ließ ihn das Fach nicht mehr los. Besonders fasziniert war er von der Welt der Immunzellen, weshalb er schließlich eine Stelle im Labor von Zanvil A. Cohn an der Rockefeller University (New York City) annahm. In seinem Büro hängte er ein Zitat von Louis Pasteur auf, jenem berühmten Mikrobiologen und Impfstoffforscher aus dem 19. Jahrhundert: »Le hazard ne favorise que les esprits préparés«, auf Deutsch etwa »Der Zufall

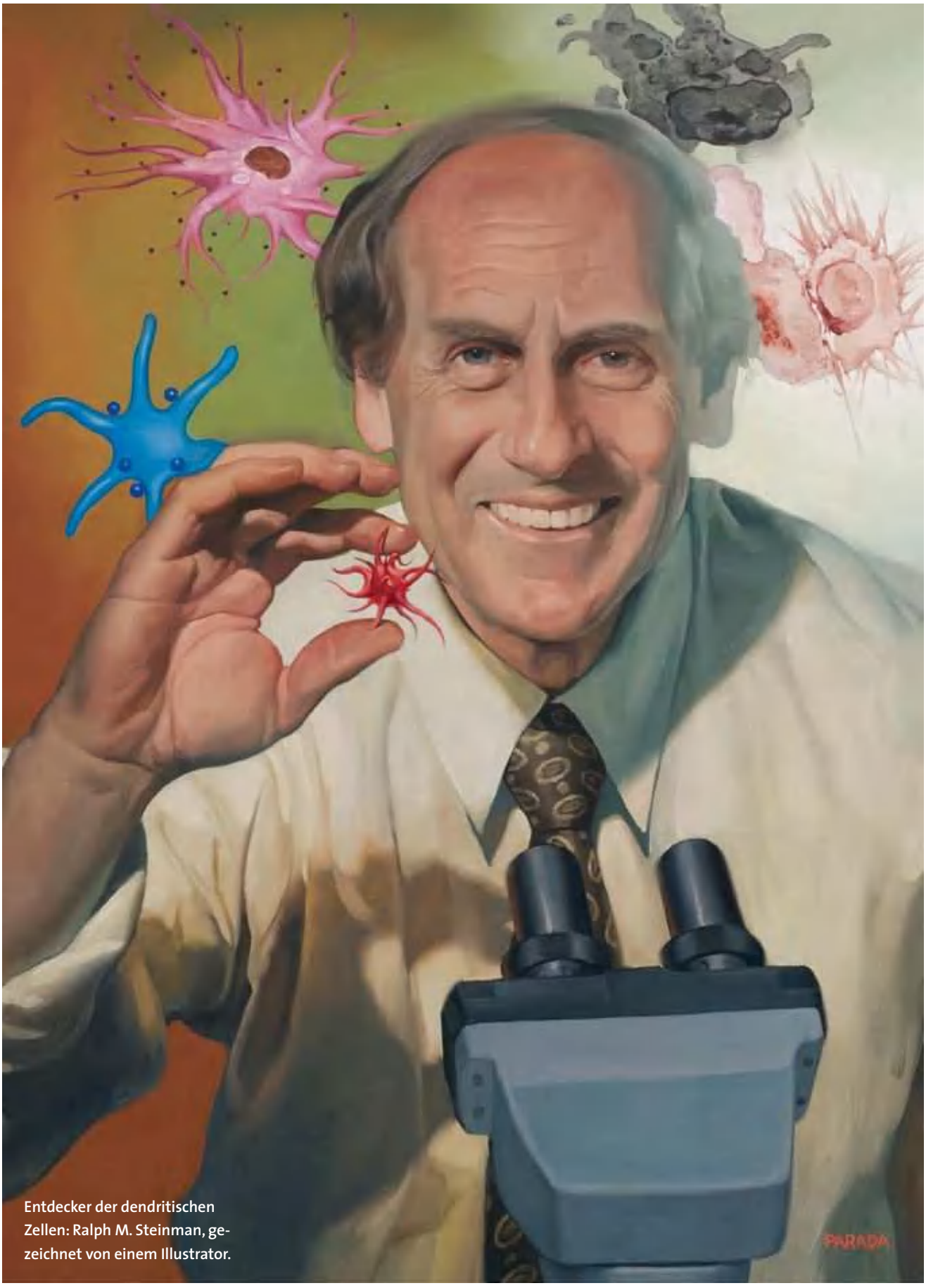
AUF EINEN BLICK

MIT DEN WAFFEN DES IMMUNSYSTEMS

1 Ralph Marvin Steinman beschrieb als Erster die **dendritischen Zellen**, die maßgeblich daran beteiligt sind, Immunreaktionen auszulösen. Sie signalisieren anderen Immunzellen, welche Ziele diese angreifen sollen.

2 Nachdem 2007 bei ihm Bauchspeicheldrüsenkrebs diagnostiziert worden war, unterzog Steinman sich der Behandlung mit mehreren **experimentellen Impfstoffen**, die auf dendritischen Zellen basierten.

3 Wahrscheinlich trugen diese Vakzinen dazu bei, dass er weit länger überlebte, als bei seiner Krankheit zu erwarten war. Er starb drei Tage, bevor ihm – ausnahmsweise posthum – der **Nobelpreis für Physiologie oder Medizin** zugesprochen wurde.



Entdecker der dendritischen Zellen: Ralph M. Steinman, gezeichnet von einem Illustrator.

ILLUSTRATION: ROBERTO PARADA

begünstigt nur den vorbereiteten Geist.« Sarah Schlesinger, eine langjährige Freundin und Kollegin Steinmans, erinnert sich: »Ralph war immer außerordentlich gut vorbereitet, und so lag es quasi in der Luft, dass er eine wichtige Entdeckung machen würde. Doch letztlich war es sein untrügliches Gespür, das ihn die wichtige Rolle der dendritischen Zellen erkennen ließ.«

Steinman verbrachte zwei Jahrzehnte damit, die Funktion der dendritischen Zellen aufzuklären und herauszufinden, wie sie sich für medizinische Zwecke nutzen lassen. »Er kämpfte mit großer Hingabe dafür, seine Kollegen zu überzeugen, dass es sich um einen speziellen Zelltyp handelt«, sagt Schlesinger, die 1977 in Steinmans Labor kam. Zu diesem Zeitpunkt waren selbst einige seiner Mitarbeiter nicht überzeugt davon, dass die dendritischen Zellen tatsächlich existieren, denn sie ließen sich nur unter großen Schwierigkeiten isolieren.

Bessere Zielkoordinaten für die Körperabwehr

In den 1980er Jahren begann Steinman damit, über Impfstoffe auf Basis dendritischer Zellen zu forschen, die sich gegen HIV und Tuberkulose richten sollten, und setzte sich auch mit Krebstherapien auseinander. Bei Krankheiten wie Influenza und Pocken, die man damals bereits mit Impfstoffen verhüten konnte, hinterlässt die Infektion bei den Überlebenden häufig einen lang anhaltenden Schutz – bei Influenza freilich nur gegen den jeweiligen Virussubtyp. HIV, Tuberkulose und Krebs erwiesen sich als weit problematischer, weil sie die Abwehrmechanismen des Immunsystems geschickt überwinden. HIV ist sogar in der Lage, dendritische Zellen für die eigenen Zwecke zu missbrauchen. Steinman wollte solche gefährlichen Erreger bekämpfen, indem er den dendritischen Zellen genauere Informationen über den Schädling mitgab, den das Immunsystem angreifen sollte.

Zusammen mit Madhav Dhodapkar, der heute an der Yale University in New Haven arbeitet, und Nina Bhardwaj, die mittlerweile an der New York University forscht, entwickelte Steinman in den 1990er Jahren ein Verfahren, um die Immunabwehr zu verstärken. Es besteht darin, dendritische Zellen aus dem Blut zu extrahieren, sie mit Antigenen zu beladen – fremden Proteinbruchstücken, etwa von Viren oder Bakterien – und anschließend in den Organismus zurückzubringen, um eine intensive Immunreaktion gegen die Antigene auszulösen. Diese Methode liegt dem weltweit ersten therapeutischen Krebsimpfstoff zu Grunde, der 2010 zugelassen wurde. Das Mittel mit dem Handelsnamen »Provenge« kann das Leben von Patienten mit fortgeschrittenem Prostatakrebs verlängern, wenn auch nur um wenige Monate (siehe SdW 3/2012, S. 24).

Anfang 2007 war Steinman auf einer wissenschaftlichen Konferenz in Colorado. Hinterher machte er dort noch ein paar Tage Schiurlaub mit der Familie. Während des Aufenthalts erkrankten er und seine beiden Töchter an einem Magen-Darm-Infekt. Die Mädchen waren schnell wieder gesund, doch Steinman erholte sich nur schleppend. Bald nach seiner Heimkehr bekam er zudem noch Gelbsucht. Er ließ sich untersuchen, unter anderem mittels Computertomografie. Auf den Schnittbildern fanden die Radiologen Ende März einen Tumor der Bauchspeicheldrüse (Pankreas), der bereits in die Lymphknoten gestreut hatte. Steinman wusste, dass er nur eine geringe Überlebenschance hatte.

»Als er uns davon berichtete, sagte er: ›Schaut nicht in Google nach – hört mir einfach zu‹«, erinnert sich seine Tochter Alexis. Sie fühlte sich, als habe ihr jemand einen heftigen Schlag versetzt. Steinman erklärte seiner Familie, es handle sich zwar um eine aggressive Tumorart, doch habe er außergewöhnlich gute Karten. Anders als die meisten Betroffenen habe er Zugang zu den weltbesten Immunologen und Krebsmedizinern sowie zu deren meistversprechenden Therapien.

> »Steinman sah seine größten Heilungschancen darin, **mit eigenen dendritischen Zellen** eine Immunreaktion gegen den Tumor auszulösen«

Gemeinsam mit Sarah Schlesinger und ihrem Mitarbeiter Michel Nussenzweig von der Rockefeller University berichtete Steinman zahlreichen Kollegen auf der ganzen Welt von seiner Erkrankung. Er war überzeugt davon, dass seine größten Heilungschancen darin lägen, mit Hilfe eigener dendritischer Zellen eine Immunreaktion gegen den Tumor auszulösen. Es blieb ihm jedoch nur wenig Zeit.

Schlesinger kontaktierte Charles Nicolette, einen Freund und langjährigen Kooperationspartner, der die Forschungsabteilung von Argos Therapeutics leitet. Das Unternehmen hat seinen Sitz in Durham, North Carolina, entwickelt Medikamente auf RNA-Basis und wurde von Steinman mitgegründet. Nicolette und seine Mitarbeiter hatten eine therapeutische Impfung auf Basis dendritischer Zellen konzipiert, die

sich gegen fortgeschrittenen Nierenkrebs richtete und gerade in der zweiten klinischen Studienphase geprüft wurde. Das Verfahren sah vor, Ribonukleinsäure (RNA) aus dem Tumor in dendritische Zellen des Patienten einzubringen, was diese dazu veranlassen sollte, die T-Zellen des Immunsystems zu einem gezielten Angriff auf den Krebs anzustacheln.

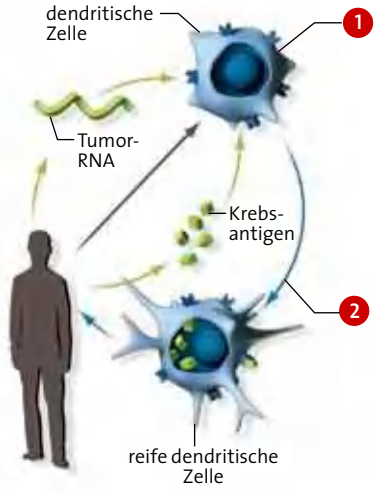
Nach Absprache aller Beteiligten ließ Steinman im April 2007 einen Teil seiner Bauchspeicheldrüse chirurgisch entfernen. Dieser als Whipple-Operation bezeichnete Eingriff gehört zu den konventionellen Maßnahmen bei der Behandlung des Pankreaskarzinoms. Das dabei entnommene Tumorgewebe verwendete Nicolettes Gruppe, um einen Impfstoff gegen Steinmans Krebs herzustellen. Es gelang gerade noch rechtzeitig, bei der US-Arzneimittelzulassungsbehörde FDA die Erlaubnis einzuholen, Steinman in die laufende klinische Studie bei Argos Therapeutics aufzunehmen.

Zudem besprach sich Steinman mit seinem langjährigen Vertrauten Jacques Banchereau, der heute das Baylor Institute for Immunology Research in Dallas leitet. Dieser wiederum rief sogleich seine Institutskollegin Anna Karolina Palucka an, die Steinman in den 1990er Jahren kennen gelernt hatte. Palucka arbeitete an einem experimentellen Impfverfahren gegen Hautkrebs, das ebenfalls auf dendritischen Zellen gründete. Sie war sofort bereit, auf Grundlage dieses Verfahrens eine Vakzine für Steinman anzufertigen. Allerdings fand sie es schwierig, den berühmten Immunologen »gleichzeitig in der Rolle des Freundes, des Patienten und des Wissenschaftlers zu sehen«.

Während die experimentellen Impfstoffe hergestellt wurden, was Monate dauerte, unterzog sich Steinman mehreren anderen Behandlungen. So absolvierte er eine Standardchemotherapie mit dem Arzneistoff Gemcitabin und mel-

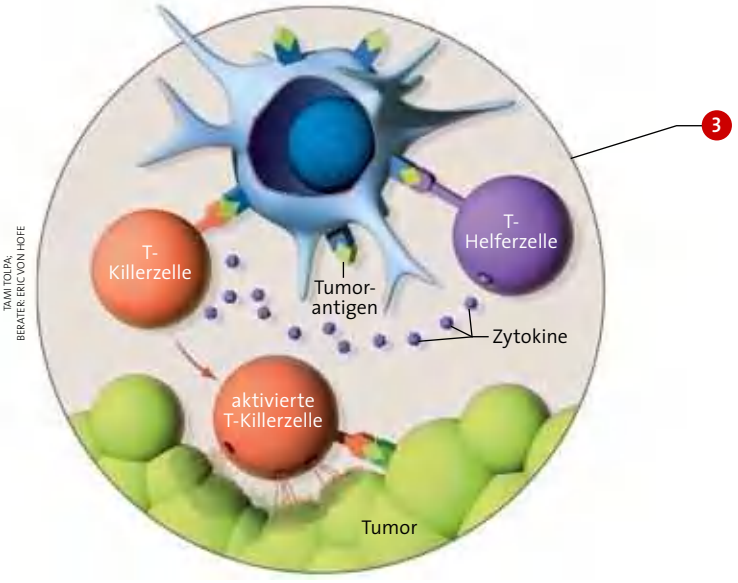
Medizin aus dem eigenen Körper

Mehrere experimentelle Krebstherapien, denen sich Steinman unterzog, nutzten genau die Zellen, die er als Erster beschrieben hatte und für deren Entdeckung er später den Nobelpreis erhielt. Das Immunsystem tötet laufend potenzielle Krebszellen ab. Doch manchmal gelingt es diesen, die Immunzellen zu überlisten und der Körperabwehr zu entgehen. Dendritische Zellen tragen dazu bei, die Immunantwort auszulösen. Indem Mediziner sie mit Bestandteilen des Tumors beladen, wollen sie die Körperabwehr auf die Krebszellen hetzen.



Dendritische Zellen werden aus dem Blut des Patienten entnommen und mit Antigenen des entsprechenden Tumortyps oder mit RNA aus dem Tumor des Patienten beladen. Die Zellen nehmen das Material auf und verarbeiten es – so setzen sie etwa die Tumor-RNA in entsprechende Antigene um.

Damit die so behandelten Zellen eine wirksame Immunreaktion gegen den Tumor auslösen, werden sie dazu angeregt, sich zu vermehren. Spezielle Wirkstoffe lassen die Zellen ausreifen, so dass sie die Tumorantigene – oder Teile davon – auf ihrer Oberfläche präsentieren. Anschließend erhält der Patient sie über eine Infusion zurück.



TAM TOLPA, BERATER: ERIC VON HOFE

Im Körper zeigen die dendritischen Zellen die fremden Proteinstücke den anderen Akteuren des Immunsystems, etwa den T-Helferzellen und den T-Killerzellen. Dies führt im Idealfall dazu, dass die T-Zellen sich mittels Zytokinen (bestimmten Signalproteinen) untereinander koordinieren, um Tumorzellen aufzuspüren und zu zerstören.

dete sich im Spätsommer für eine Studie mit GVAX an, einer immunstimulierenden Vakzine. In einer vorangegangenen Phase-II-Studie hatten Patienten mit Bauchspeicheldrüsenkrebs, die das Mittel erhalten hatten, durchschnittlich vier Monate länger überlebt als die Kontrollgruppe. Zwei Monate lang fuhr Sarah Schlesinger fast jede Woche mit Steinman nach Boston, wo er den Impfstoff verabreicht bekam.

Steinmans Gesundheitszustand blieb relativ stabil. Im September 2007 erhielt er den Albert-Lasker-Preis für medizinische Grundlagenforschung, den viele als Vorboten des Nobelpreises ansehen. Auch gab er eine Reihe von Interviews. Darin ging er auf das Potenzial dendritischer Zellen im Kampf gegen Krebs ein. Er betonte, die Immuntherapie wirke zielgerichtet, hochspezifisch und habe sehr viel weniger Nebenwirkungen als die Chemotherapie. »Ich meine, dass sich uns hier die Möglichkeit eröffnet, eine völlig neue Art der Krebstherapie zu entwickeln«, sagte er. »Aber wir brauchen mehr Forschung und viel Geduld, um die zu Grunde liegenden Mechanismen zu verstehen.«

Groß angelegter Selbstversuch

Nach der Diagnose seiner Krebserkrankung erhielt Steinman zahlreiche Angebote von Freunden und Kollegen, an experimentellen Behandlungen teilzunehmen. Nach reiflicher Überlegung entschied er sich für eine Reihe innovativer Immuntherapien. Diese wurden gerade in klinischen Studien getestet, an denen er als Einzelpatient teilnehmen konnte, wobei für ihn ein besonderes Protokoll galt. Steinman unterzog sich dort der Behandlung mit experimentellen Impfstoffen, von denen einige speziell an seine Krebserkrankung angepasst waren. Zusätzlich ließ er sich mit verschiedenen Chemotherapien behandeln.

Sommer und Herbst 2007
Behandlung mit GVAX, einem immunstimulierenden Impfstoff, der an der Johns Hopkins University entwickelt wurde

Ende 2007
Therapie mit einem Hemmstoff bestimmter Zellsignalmoleküle in einer Studie der Firma Genentech. Die Behandlung zielt darauf ab, eine abnormale zelluläre Kommunikation zu unterbinden, die das Tumorwachstum fördern kann.

Winter 2007 und Frühjahr 2008
Steinman erhält eine Vakzine auf Basis dendritischer Zellen, die klinisch auf Wirksamkeit gegen Nierenkrebs getestet wird.

2008 bis 2010
Erneute Therapie mit einem Impfstoff auf Basis dendritischer Zellen. Entwickelt wurde die Vakzine eigentlich gegen Hautkrebs.

Mitte 2010
Kombination der Immuntherapie mit der experimentellen immunstimulierenden Substanz Hiltonol. Damit soll das Immunsystem aktiviert werden, unter anderem durch eine forcierte Ausschüttung des Signalmoleküls Interferon.

Winter und Sommer 2010
Behandlung mit dem Wirkstoff Ipilimumab, einem monoklonalen Antikörper, der für die Therapie von schwarzem Hautkrebs zugelassen wurde

Manchmal zeigte er mehr Geduld, als den Kollegen lieb war. Im Kampf gegen seinen Krebs sprach er sich anfangs für ein langsames, schrittweises Vorgehen aus, so dass nach jeder Behandlung erst seine Immunreaktionen untersucht werden könnten, bevor die nächste Behandlung begänne. Doch Schlesinger und Nussenzweig machten ihm klar, dass dazu schlicht keine Zeit sei – falls er stürbe, seien das Experiment und damit auch die Datengewinnung beendet.

Ein Feuerwerk von experimentellen Therapieverfahren

Im November 2007 war Nicolettes Impfstoff fertig. Er bestand aus dendritischen Zellen aus Steinmans Blut, die mit RNA aus seinem Tumor behandelt worden waren. Steinman hatte gerade eine Chemotherapie hinter sich und trat nun der klinischen Studie von Argos Therapeutics bei – als Einzelpatient, für den ein spezielles Protokoll galt.

Anfang 2008 folgte der Impfstoff von Anna Karolina Palucka, der zwar eigentlich gegen Hautkrebs entwickelt worden war, in diesem Fall aber Proteinbruchstücke aus Steinmans Tumorzellen enthielt. Palucka erwartete deshalb, dass er die Körperabwehr auf den Krebs lenken würde.

Auch andere Mediziner schlugen experimentelle Therapien vor. »Jeder bot das Beste an, was er zur Verfügung hatte«, berichtet Palucka. Steinman hatte über Jahrzehnte hinweg mit zahlreichen Kollegen zusammengearbeitet, die nun versuchten, ihm zu helfen. Außer an medizinischen Standardbehandlungen nahm er – als spezieller Einzelpatient – an vier laufenden klinischen Studien teil, in denen verschiedene innovative Impfstoffe getestet wurden. Die meisten davon waren noch nie auf Wirksamkeit gegen Bauchspeicheldrüsenkrebs geprüft worden. Darüber hinaus unterzog er sich noch anderen experimentellen Immun- und Chemotherapien.

Diesen Selbstversuch führte Steinman durch wie ein Laborexperiment: Er sammelte Daten, prüfte Befunde und entwarf Strategien. Besonders aufmerksam beobachtete er, wie sein Körper auf die Behandlungen reagierte. Detailliert protokollierte er die Reaktionen seiner Haut nach dem Spritzen der Impfstoffe. Schlesinger erinnert sich an eine Episode im Jahr 2008: Steinman unterzog sich gerade der Behandlung mit Paluckas Vakzine, als die Forscherin ihn in New York besuchte. Nach einer Injektion zeigte er ihr begeistert die geschwollene Einstichstelle. »Das sind T-Zellen!«, freute er sich darüber, dass sein Immunsystem offenkundig auf den Eingriff reagiert hatte, »das ist fantastisch!« Ein anderes Mal, nachdem bei ihm der Blutspiegel eines Tumormarkers (eines Proteins, das den Fortschritt der Krebserkrankung anzeigt) wiederholt zurückgegangen war, schrieb er eine E-Mail mit der Betreffzeile »Das Ergebnis ist reproduzierbar!«, als habe er einen wissenschaftlichen Durchbruch erzielt.

Doch gerade als Forscher konnte er eine gewisse Unzufriedenheit nicht verhehlen. Dass sein Ein-Mann-Selbstversuch keinen wissenschaftlichen Standards genügen konnte, frustrierte ihn anhaltend. Da die verschiedenen Therapien so dicht aufeinander folgten, war es unmöglich zu ermitteln,

W I S wissenschaft in die schulen!

Didaktische Materialien für den Unterricht zum Thema »Krebs« kostenfrei herunterladen unter:

www.wissenschaft-schulen.de/krebs

welche Intervention was bewirkt hatte. Dennoch gelang es ihm, interessante Daten zu sammeln. Bei einem Immunfunktionstest, den Palucka während der Behandlung durchführte, beobachtete sie, dass etwa acht Prozent von Steinmans T-Killerzellen auf Tumorantigene reagierten. Das erscheint im ersten Moment nicht sehr beeindruckend, doch wenn man bedenkt, wie vielen Krankheitserregern der Körper ausgesetzt ist, stellt dies einen beachtlich hohen Prozentsatz dar. »Eine der Behandlungen oder eine Kombination aus mehreren Interventionen hatte ihn gegen den Tumor immunisiert«, sagt Schlesinger.

Im Juni 2011 reiste Steinman mit seiner Frau Claudia anlässlich ihres vierzigsten Hochzeitstags nach Italien. Da hatte er die mittlere Überlebenszeit eines Pankreaskarzinom-Patienten bereits weit überschritten. Im September 2011 arbeitete er noch immer im Labor und bereitete sich auf eine neue Therapie mit dem Argos-Impfstoff vor. Doch Ende des Monats erkrankte er an einer Lungenentzündung. »Als er ins Krankenhaus eingeliefert wurde, sagte er, ›Ich bin nicht sicher, ob ich hier wieder herauskomme‹«, erinnert sich seine Tochter Alexis. Am Freitag, dem 30. September, starb er schließlich im Alter von 68 Jahren. Sein krebsgeschwächter Körper hatte die Lungenentzündung nicht mehr unter Kontrolle bringen können.

Ehrung eines Toten

Die Angehörigen waren zunächst unsicher, wie sie die Nachricht den zahlreichen Freunden und Kollegen Steinmans in aller Welt mitteilen sollten. Sie entschieden sich dafür, am Montag sein Labor aufzusuchen, um dort persönlich mit den ehemaligen Kollegen zu sprechen. Doch zeitig am Morgen, als alle noch schliefen, kam ein Anruf aus Stockholm. Steinmans Blackberry war stummgeschaltet und lag auf dem Nachttisch. Seine Frau sah verschlafen ein Licht blinken, das eine neue Nachricht anzeigte. Kurz darauf öffnete sich eine E-Mail, die Steinman höflich darüber informierte, dass er den Nobelpreis 2011 für Physiologie oder Medizin erhalten solle.

Nachdem das Nobelkomitee die Entscheidung bekannt gegeben hatte, setzte der übliche Presserummel ein. Artikel wurden geschrieben, und es gab Verlautbarungen über Steinman und die beiden anderen Preisträger, Bruce Beutler vom Scripps Research Institute (Kalifornien) und Jules Hoffmann von der Universität Straßburg – bis einige Stunden später die Nachricht von Steinmans Tod die Runde machte. Den Statuten der Nobelstiftung nach kann der Preis nur dann posthum vergeben werden, wenn der Preisträger zwischen der Bekanntgabe im Oktober und der Verleihung im Dezember stirbt. In Steinmans Fall zwang die ungewöhnliche Überschneidung der Ereignisse die Nobelversammlung zu eingehenden Beratungen, deren Ergebnis die Öffentlichkeit gespannt erwartete. Gegen Abend entschied das Komitee, dass Steinman Preisträger bleiben würde.

Wenige Tage darauf starb auch Steve Jobs, Mitbegründer und Geschäftsführer der Firma Apple, an Bauchspeicheldrüsenkrebs. Er hatte an einer seltenen, langsam wachsenden Krebsart gelitten – einem neuroendokrinen Tumor. Jobs erlag ihr acht Jahre nach der Diagnose, was etwa dem Mittelwert bei dieser Erkrankung entspricht. Steinmans Überlebenszeit hingegen war überdurchschnittlich lang. »Es gibt keinen Zweifel, dass eine der Therapiemaßnahmen dafür verantwortlich war«, meint Schlesinger.

Die Forscher versuchen nun herauszufinden, welche von den verschiedenen Behandlungen es gewesen sein könnte. Anfang dieses Jahres eröffnete die Baylor University das Ralph Steinman Center for Cancer Vaccines (Ralph-Steinman-Zentrum für Krebsimpfstoffe), und Palucka plant eine klinische Studie, in der sie Patienten mit Bauchspeicheldrüsenkrebs mit demselben Impfmittel behandeln will, das sie – gemeinsam mit Kollegen – für Steinman entwickelt hatte. Bei Argos Therapeutics wiederum treibt Nicolette die Entwicklung der Nierenkrebs-Vakzine voran: »Wir sind es Ralph schuldig, dieses Projekt zum Erfolg zu führen.« Demnächst soll eine Phase-III-Studie mit dem Nierenkrebs-Impfstoff starten, den Steinman an sich selbst getestet hatte.

DIE AUTORIN

Katherine Harmon ist Redakteurin bei »Scientific American«.

QUELLEN

Bauer, C. et al.: Dendritic Cell-Based Vaccination of Patients with Advanced Pancreatic Carcinoma: Results of a Pilot Study. In: Cancer Immunology, Immunotherapy 60, S. 1097–1107, 2011

Palucka, A.K. et al.: Taming Cancer by Inducing Immunity via Dendritic Cells. In: Immunological Reviews 220, S. 129–150, 2007

Steinman, R.M., Cohn, Z.A.: Identification of a Novel Cell Type in Peripheral Lymphoid Organs of Mice. I. Morphology, Quantitation, Tissue Distribution. In: Journal of Experimental Medicine 137, S. 1142–1162, 1973

WEBLINKS

Video über verschiedene Ansätze von Krebsimmuntherapien: **www.spektrum.de/artikel/1158421**
Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1157697**

QUANTENPHYSIK

Mit einem Rechentrick zur umfassenden Theorie der Naturkräfte

Bei den heftigsten Kollisionen in Teilchenbeschleunigern versagen alle gängigen mathematischen Beschreibungen. Doch ein neuer Ansatz verspricht Abhilfe. Was Physiker besonders begeistert: Damit dürfte sich auch die Schwerkraft zwanglos in das theoretische Modell der Welt einfügen – ein lang gehegter Traum könnte wahr werden.

Von Zvi Bern, Lance J. Dixon und David A. Kosower

An einem sonnigen Frühlingstag stieg unser Koautor Dixon an der Station Mile End in die Londoner U-Bahn, um zum Flughafen Heathrow zu fahren. Er musterte den Fahrgast gegenüber – einen von mehr als drei Millionen, die tagtäglich die U-Bahn nutzen – und fragte sich zum Zeitvertreib: Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass der Fremde in Wimbledon aussteigt? Wie lässt sich das berechnen, wenn er alle möglichen Wege nehmen könnte? Plötzlich erkannte Dixon, dass die Frage den vertrackten Problemen gleicht, vor denen Teilchenphysiker stehen, wenn sie die Vorgänge in modernen Beschleunigern vorhersagen möchten.

So jagen Forscher mit dem Large Hadron Collider (LHC) am europäischen Kernforschungszentrum CERN bei Genf Protonen mit nahezu Lichtgeschwindigkeit gegeneinander, um die Kollisionstrümmer zu analysieren. Der Bau des Beschleunigers und seiner Detektoren war eine Herkulesaufgabe. Ebenso mühsam, wenn auch weniger augenfällig, ist die Deutung der Detektordaten. Das mag auf den ersten Blick seltsam erscheinen. Das so genannte Standardmodell der Teilchenphysik (siehe Spektrum der Wissenschaft 9/2003, S. 26) hat sich vielfach bewährt, und Theoretiker verwenden es routinemäßig, um experimentelle Resultate vorherzusagen. Dabei nutzen sie ein Rechenverfahren, das der berühmte amerikanische Physiker Richard Feynman (1918–1988, Nobelpreis 1965) schon vor gut 60 Jahren entwickelt hat.

Doch bei modernen Problemen versagt die Methode. Sie liefert zwar einen anschaulichen, ungefähren Zugang zu den einfachsten Abläufen, ist aber hoffnungslos umständlich bei komplizierten Prozessen und für hochpräzise Berechnungen. Die Folgen einer Teilchenkollision sind noch schwieriger vorherzusagen als die Wege eines U-Bahn-Passagiers. Selbst alle Computer der Welt gemeinsam wären nicht im Stande, das Ergebnis einer gewöhnlichen Kollision im LHC zu bestimmen. Wenn aber die Theoretiker nicht einmal für bekannte physikalische Gesetze und Materieformen präzise Vorhersagen treffen können, wie können wir dann beispielsweise feststellen, ob im Beschleuniger etwas wirklich Neues stattgefunden hat? Vielleicht hat der LHC schon die Antwort auf einige unserer größten Fragen an die Natur geliefert, und wir tappen weiter im Dunkeln, weil wir die Gleichungen des Standardmodells nicht exakt genug zu lösen vermögen.

Daher haben wir kürzlich ein neues Verfahren zur Analyse von Teilchenprozessen entwickelt, das die Komplikationen der Feynman-Technik umschifft. Die so genannte Unitaritätsmethode sagt ohne unnötigen Aufwand voraus, was ein U-Bahn-Fahrer tun wird, indem sie einkalkuliert, dass die Möglichkeiten des Passagiers an jedem Entscheidungspunkt

AUF EINEN BLICK

NEUE HOFFNUNG AUF DIE ALLUMFASSENDE THEORIE

1 Berechnungen von Teilchenkollisionen beruhen auf einem Verfahren, das der Physiker Richard Feynman entwickelt hat. Doch bei starken Wechselwirkungen stößt die Methode der **Feynman-Diagramme** an ihre Grenzen.

2 Die Autoren haben ein neues Verfahren entwickelt, das auch unter den extremen Bedingungen funktioniert, die im Large Hadron Collider (LHC) herrschen. Die **Unitaritätsmethode** hilft bei der Suche nach exotischen Teilchen und Kräften.

3 Das neue Verfahren weckt Hoffnungen auf eine **einheitliche Theorie** aller Wechselwirkungen. Die Gravitation erscheint darin als eine doppelte Kopie der starken Kraft.

KENN BROWN UND CHRIS WREN, MONDOLITHIC STUDIOS

recht beschränkt sind und sich durch die Wahrscheinlichkeiten unterschiedlicher Handlungssequenzen darstellen lassen. Viele vordem unlösbare theoretische Probleme der Teilchenphysik werden durch die neue Idee enorm vereinfacht. Die Lösungen liefern so detaillierte Vorhersagen, dass wir eine den Rahmen der gängigen Theorie sprengende Entdeckung leicht erkennen würden. Außerdem stellt sie eine Alternative zum Standardmodell zur Verfügung, die unter Physikern als Vorstufe einer vereinheitlichten Theorie aller Naturkräfte gilt.

Die Unitaritätsmethode

Der Unitaritätsansatz ist nicht bloß ein hilfreicher Rechentrick. Er eröffnet einen völlig neuartigen Zugang zu Wechselwirkungstheorien, in denen überraschende Symmetrien auftauchen und eine bislang unterschätzte Eleganz des Standardmodells zum Ausdruck bringen. Vor allem nimmt dadurch der jahrzehntealte Versuch, Quantenmechanik und allgemeine Relativitätstheorie zu einer Quantentheorie der Gravitation (siehe Spektrum der Wissenschaft, Titelthema 4/2012, S. 34) zu vereinen, eine unerwartete Wendung. Bis in die 1970er Jahre nahmen Physiker an, die Gravitation verhalte sich wie die anderen Naturkräfte, und suchten die vorhandenen Theorien entsprechend zu erweitern. Doch bei Anwendung der Feynman-Methode ergaben sich entweder unsinnige Resultate, oder der mathematische Aufwand stieg ins Unermessliche. Anscheinend war die Gravitation eben doch keine Kraft wie die anderen. Entmutigt wandten sich die Physiker exotischen Ideen wie Supersymmetrie und Stringtheorie zu.

»Mit Hilfe der Unitaritätsmethode können wir tatsächlich Berechnungen durchführen, die früher als **hoffnungslos schwierig** galten«

Doch mit Hilfe der Unitaritätsmethode können wir tatsächlich Berechnungen durchführen, die in den 1980er Jahren versucht wurden, aber damals als hoffnungslos schwierig galten. Wie wir herausgefunden haben, sind die Probleme nicht unüberwindlich. Die Gravitation ähnelt in der Tat den anderen Kräften, allerdings auf unerwartete Weise: Sie verhält sich wie eine »Doppelkopie« der starken Kernkraft, welche die Bausteine des Atomkerns zusammenhält. Die starke Kraft wird durch so genannte Gluonen übertragen; die Quantenteilchen der Gravitation sind die Gravitonen. In dem neuen Modell verhält sich jedes Graviton wie zwei zusammengeheftete Gluonen. Dieses Bild mutet seltsam an, und sogar Experten wissen nicht genau, was es bedeutet. Dennoch liefert das Doppelkopie-Modell einen Zugang zur Vereinigung der Gravitation mit den anderen Kräften.

Feynmans Methode ist so überzeugend und nützlich, weil sie extrem komplizierte Rechnungen grafisch darstellt: mit Hilfe von Diagrammen, die das Zusammentreffen zweier oder mehrerer Teilchen anschaulich darstellen. Um quantitative Vorhersagen zu treffen, zeichnet der Forscher mehrere Diagramme, die jeweils einen möglichen Verlauf einer bestimmten Teilchenkollision symbolisieren – analog zu den Routen, die ein U-Bahn-Fahrer wählen kann. Gemäß detaillierten Regeln, die Feynman und seine Kollegen, insbesondere der englische Physiker Freeman Dyson, aufgestellt haben, weist der Theoretiker nun jedem Diagramm eine Zahl zu, welche die Wahrscheinlichkeit des entsprechenden Ereignisses angibt.

Leider ist die Anzahl der möglichen Diagramme enorm – im Prinzip unendlich groß. Für den von Feynman ursprünglich anvisierten Zweck machte dieser Nachteil nichts aus. Er untersuchte die Quantenelektrodynamik (QED), die beschreibt, wie Elektronen mit Photonen wechselwirken. Die charakteristische Größe der Wechselwirkung, die so genannte Kopplungskonstante, beträgt in diesem Fall rund 1/137. Der kleine Wert sorgt dafür, dass komplizierte Diagramme in der Berechnung eine geringe Rolle spielen und oft ganz ignoriert werden können. Um im Vergleich zu bleiben: Der U-Bahn-Fahrer nimmt wahrscheinlich eine einfache Strecke.

Zwei Jahrzehnte später erweiterten die Physiker Feynmans Methode auf die starke Kraft, welche die Quantenchromodynamik (QCD) theoretisch beschreibt. Auch hier gibt es eine Kopplungskonstante, doch deren Wert ist, wie schon das Wort »stark« nahelegt, größer als bei der elektromagnetischen Wechselwirkung. Das erhöht zunächst die Anzahl komplizierter Diagramme, die in den Rechnungen berücksichtigt werden müssen – als würde ein U-Bahn-Fahrer bereitwillig große Umwege nehmen und damit ein schlecht vorhersagbares Verhalten zeigen. Zum Glück verschwindet die Kopplungskonstante für sehr kurze Abstände, wie sie bei den extrem energiereichen Prozessen im LHC entscheidend sind. Darum reicht es für die einfachsten Kollisionen wiederum aus, nur unkomplizierte Feynman-Diagramme zu berücksichtigen.

Grenzen des Feynman-Diagramms

Doch bei unübersichtlichen Teilchenprozessen wird die Methode äußerst unhandlich. Man klassifiziert Feynman-Diagramme nach der Anzahl der externen Linien sowie der darin enthaltenen geschlossenen Schleifen (siehe Kasten gegenüber). Die Schleifen spiegeln eine grundlegende Eigenheit der Quantentheorie wider: Es gibt darin virtuelle Teilchen. Diese sind nicht direkt beobachtbar, üben aber einen messbaren Einfluss auf die Stärke der Naturkräfte aus. Virtuelle Teilchen gehorchen den üblichen Naturgesetzen, insbesondere der Energie- und Impulserhaltung, mit einer Einschränkung: Ihre Masse kann von derjenigen der »realen« – direkt beobachtbaren – Partikel abweichen. Die Schleifen symbolisieren ihr flüchtiges Dasein. Sie entstehen, bewegen sich ein winziges Stück weit und verschwinden wieder. Ihre Masse bestimmt ihre Lebenserwartung: je schwerer, desto kurzlebiger.

Die einfachsten Feynman-Diagramme – so genannte Baumdiagramme – vernachlässigen die virtuellen Teilchen;

sie enthalten keine geschlossenen Schleifen. Für die Quantenelektrodynamik zeigen sie zwei Elektronen, die einander durch Austausch eines Photons abstoßen. In komplizierteren Diagrammen kommen dann sukzessive Schleifen hinzu, die Physiker als Störungsterme bezeichnen. Dabei beginnt man mit einer groben Schätzung in Form eines Baumdiagramms und verbessert sie schrittweise durch Hinzufügen von »Störungen« in Form von Schleifen. Beispielsweise kann sich das Photon auf seinem Weg zwischen den beiden Elektronen spontan in ein virtuelles Elektron und ein virtuelles Antielektron aufspalten, die einander sofort vernichten und wieder ein Photon erzeugen. Dieses setzt den Weg des ursprünglichen Photons fort. Auf der nächsten Komplexitätsebene können sich Elektron und Antielektron ihrerseits vorübergehend aufspalten. Mit zunehmender Anzahl virtueller Teilchen beschreiben die Diagramme die Quanteneffekte immer genauer.

Selbst Baumdiagramme können sich als schwierig erweisen. Würde man im Fall der QCD einen Zusammenstoß zwischen zwei Gluonen betrachten, aus dem acht Gluonen hervorgehen, so müsste man zehn Millionen Baumdiagramme zeichnen und für jedes die Wahrscheinlichkeit berechnen. Ein Ansatz namens Rekursion, den Frits Berends an der Universität Leiden (Niederlande) und Walter Giele vom Fermi National Acceleration Laboratory in Batavia (US-Bundesstaat Illinois) in den 1980er Jahren entwickelten, vereinfacht zwar das Problem bei Baumdiagrammen, lässt sich aber nicht ohne Weiteres auf Schleifen erweitern. Geschlossene Schleifen erschweren die Rechenaufgabe enorm. Schon eine einzige erhöht Anzahl und Komplexität der Diagramme fast ins Unermessliche. Die mathematischen Formeln könnten eine ganze Enzyklopädie füllen. Auch die Rechenkraft leistungsfähigster Computer vermag mit dem Anstieg der Komplexität nur ein Stück weit Schritt zu halten; bald unterliegen sie der wachsenden Anzahl externer Teilchen oder interner Schleifen.

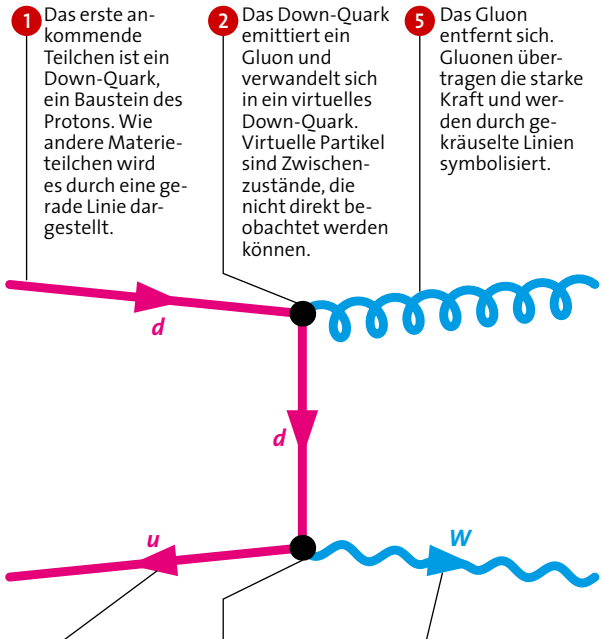
Über die übliche Methode hinaus

Zudem werden die zunächst anschaulichen Diagramme rasch völlig unübersichtlich. Schon einzelne Feynman-Graphen sind oft undurchdringlich verschnörkelt, und wenn wir mit vielen jonglieren müssen, verlieren wir jeden Kontakt mit der eigentlichen Physik. Erstaunlicherweise kann sich das Endresultat, das aus dem Aufsummieren sämtlicher Diagramme hervorgeht, als ganz einfach herausstellen. Unterschiedliche Diagramme heben einander teilweise auf, und manchmal reduzieren sich Formeln mit Millionen Termen auf einen einzigen Ausdruck. Solche Aufhebungen deuten an, dass die Diagramme das falsche Werkzeug sind. Es muss eine bessere Methode geben.

Jahrelang probierten die Physiker viele neue Rechenmethoden aus, bis sich allmählich eine Alternative zu den Feynman-Diagrammen abzeichnete. Wie die Koautoren Bern und Kosower in den frühen 1990er Jahren zeigten, vermag die Stringtheorie die QCD-Rechnungen so zu vereinfachen, dass

Feynman-Diagramme

Unentwegt und überall ziehen Elementarteilchen einander an oder stoßen sich ab, kollidieren, verändern sich oder vernichten einander. Um das quantenmechanische Wirrwarr zu ordnen, erfand Nobelpreisträger Richard Feynman die nach ihm benannten Diagramme. Im Beispiel unten wechselwirken zwei Quarks und erzeugen ein Gluon und ein W-Boson.



1 Das erste ankommende Teilchen ist ein Down-Quark, ein Baustein des Protons. Wie andere Materieteilchen wird es durch eine gerade Linie dargestellt.

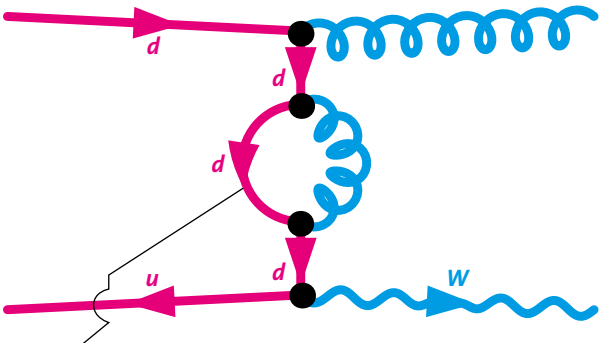
2 Das Down-Quark emittiert ein Gluon und verwandelt sich in ein virtuelles Down-Quark. Virtuelle Partikel sind Zwischenzustände, die nicht direkt beobachtet werden können.

5 Das Gluon entfernt sich. Gluonen übertragen die starke Kraft und werden durch gekräuselte Linien symbolisiert.

3 Das zweite ankommende Teilchen ist ein Up-Antiquark. Bei Antiteilchen zeigt der Zeitpfeil im Feynman-Diagramm rückwärts.

4 Das Up-Antiquark und das virtuelle Down-Quark vernichten einander und hinterlassen ein W-Boson.

6 Das W-Boson entweicht und verwandelt sich rasch in Quarks und andere Teilchen. W-Bosonen übertragen die schwache Kraft und werden durch Wellenlinien dargestellt.



7 Eine geschlossene Schleife bezeichnet zusätzliche virtuelle Teilchenzustände, die spontan entstehen können. Hier emittiert das virtuelle Down-Quark ein virtuelles Gluon und absorbiert es sofort wieder.

ZVI BERN, LANCE J. DIXON, DAVID A. KOSOWER UND HARALD ITA

alle relevanten Feynman-Diagramme zu einer einzigen Formel zusammengefasst werden. Mit dieser Formel analysierten wir drei eine Teilchenreaktion, die zuvor niemand genau verstanden hatte: die Streuung von zwei Gluonen, aus der drei Gluonen entstehen, mit einer Schleife aus virtuellen Teilchen. Dieser Vorgang war für damalige Verhältnisse sehr kompliziert, ließ sich aber nun durch eine erstaunlich simple Formel, die auf eine DIN-A4-Seite passte, vollständig beschreiben.

Die Formel war so einfach, dass wir gemeinsam mit David Dunbar, der damals an der University of California in Los Angeles forschte, den Streuvorgang fast vollständig mit Hilfe eines Prinzips namens Unitarität interpretieren konnten. Es beschreibt die Forderung, dass die Wahrscheinlichkeiten aller möglichen Ergebnisse sich auf 100 Prozent summieren müssen. Genau genommen geht es um die Quadratwurzel der Wahrscheinlichkeiten, aber das spielt hier keine besondere Rolle. Die Unitarität gehört auch schon zu Feynmans Methode, wird dort aber durch die komplizierten Berechnungen verdeckt. Unser Verfahren stellt das Prinzip in den Vordergrund.

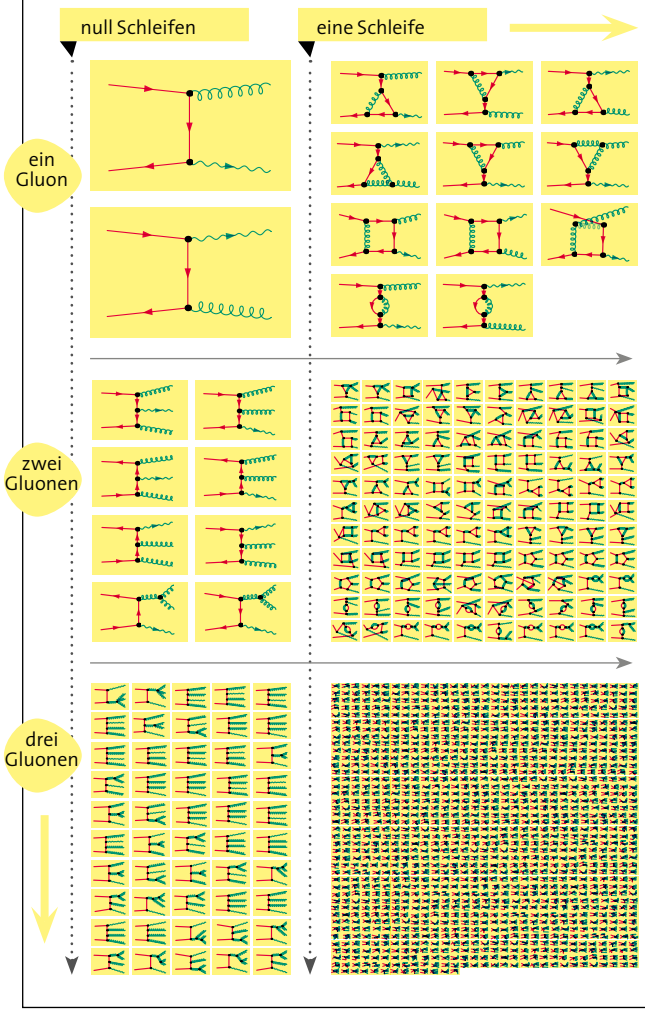
Die Unitaritätsmethode ist so erfolgreich, weil sie den direkten Gebrauch virtueller Teilchen vermeidet; die sind ja der Hauptgrund für die Unhandlichkeit der Feynman-Diagramme. Solche Teilchen haben sowohl reale als auch unechte Effekte. Letztere müssen sich per definitionem aus dem Endergebnis herauskürzen; sie sind mathematischer Ballast, den Physiker nur zu gern abwerfen.

Um die Methode zu verstehen, vergleichen wir sie wie oben mit einem komplizierten Verkehrssystem wie der Londoner U-Bahn, mit jeweils mehreren möglichen Verbindungen zwischen den Stationen. Angenommen, wir suchen die Wahrscheinlichkeit dafür, dass eine Person, die bei Mile End eingestiegen ist, die U-Bahn bei Wimbledon verlässt. Das Feynman-Verfahren summiert die Wahrscheinlichkeiten aller möglichen Wege: nicht nur der Schienenstrecken, sondern auch jener durch natürliches Felsgestein ohne U-Bahn-Linien oder Tunnel. Diese unrealistischen Wege entsprechen den Beiträgen, die von den Schleifen der virtuellen Teilchen stammen. Sie heben sich zwar am Ende auf, aber bei den Zwischenstufen der Berechnung müssen wir sie alle berücksichtigen. Beim Unitaritätsansatz betrachten wir nur sinnvolle Pfade. Wir berechnen die Wahrscheinlichkeit, dass eine Person einen bestimmten Weg wählt, indem wir das Problem unterteilen: Mit welcher Wahrscheinlichkeit geht die Person an jedem Punkt der Fahrt durch dieses Drehkreuz, nimmt diesen oder jenen Fußweg? Diese Vorgehensweise schränkt das Ausmaß der Berechnungen drastisch ein.

Die Entscheidung zwischen Feynman-Verfahren und Unitaritätsmethode ist keine Frage von richtig oder falsch. Beide drücken dieselben physikalischen Grundprinzipien aus. Beide führen letztlich zu denselben Wahrscheinlichkeitswerten. Doch sie stellen unterschiedliche Beschreibungsebenen dar. Ein einzelnes Feynman-Diagramm unter den zehntausenden, die für eine unübersichtliche Kollision erforderlich sind, gleicht einem Wassermolekül in einem Tropfen. Im Prinzip könnte man das Verhalten einer Flüssigkeit bestimmen, indem man sämtliche Moleküle einzeln verfolgt, aber das wäre höchstens für ein mikroskopisch kleines Tröpfchen sinnvoll. Normalerweise ist das nicht nur mühsam, sondern vielleicht auch gar nicht aufschlussreich. Wenn Wasser etwa einen Hügel hinabfließt, geht das aus der molekularen Beschreibung kaum hervor. Besser betrachtet man Eigenschaften einer höheren Beschreibungsebene wie Strömungsgeschwindigkeit, Dichte und Druck (siehe »Komplexität und Emergenz« von Michael Springer in diesem Heft ab S. 48). Ebenso können Physiker nun eine Teilchenkollision ganzheitlich betrachten, statt sie Stück für Stück aus separaten Feynman-Diagram-

Wo Feynman versagt

Jedes Feynman-Diagramm stellt auf anschauliche Weise eine mögliche Wechselwirkung zwischen Teilchen dar. Doch es gibt unzählig viele andere Möglichkeiten. Eine Wechselwirkung zwischen zwei Quarks kann mehr als ein Gluon erzeugen oder mehr als eine virtuelle Teilchenschleife enthalten – oder beides. Die Berechnungen werden rasch undurchführbar.



ZVI BERN, LANCE J. DIXON, DAVID A. KOSOWER UND HARALD ITA

men zu rekonstruieren. Wir konzentrieren uns auf die Eigenschaften, die den gesamten Prozess charakterisieren: die Unitarität sowie spezielle mit ihr zusammenhängende Symmetrien. In Sonderfällen vermögen wir sogar absolut präzise theoretische Vorhersagen zu treffen – was mit der Feynman-Methode unendlich viele Diagramme und unendlich lange Zeit erfordern würde.

Es gibt noch weitere Vorteile. Nachdem wir die Unitaritätsmethode für virtuelle Teilchenschleifen entwickelt hatten, fügten Ruth Britto, Freddy Cachazo, Bo Feng und Edward Witten am Institute for Advanced Study in Princeton (New Jersey) eine wichtige Ergänzung hinzu. Sie nahmen sich erneut die Baumdiagramme vor und berechneten die Wahrscheinlichkeit einer Kollision, an der beispielsweise fünf Teilchen beteiligt sind, mit Hilfe der Wahrscheinlichkeit einer Vierteilchenkollision mit anschließender Aufspaltung eines Teilchens in zwei Partikel. Das ist ein verblüffender Trick, denn eine Fünfteilchenkollision sieht normalerweise ganz anders aus als diese zwei aufeinander folgenden Vorgänge. Doch er zeigt: Komplizierte Teilchenprozesse lassen sich vielfach in einfachere Stücke unterteilen.

Schmutzige Explosionen

Die Protonenzusammenstöße am LHC verlaufen besonders komplex. Feynman selbst verglich solche Experimente mit dem Versuch, das Innenleben von Schweizer Uhren zu ergründen, indem man sie paarweise zertrümmert. Protonen bestehen aus Quarks und Gluonen, die durch die starke Kraft zusammengehalten werden. Beim Zusammenstoß können Quarks von Quarks abprallen, Quarks von Gluonen, Gluonen von Gluonen. Quarks und Gluonen können sich in weitere Quarks und Gluonen aufspalten. Schließlich bilden sie zusammengesetzte Teilchen, die in schmalen Spritzern – so genannten Jets – aus dem Beschleuniger schießen.

Irgendwo in diesem Durcheinander könnte sich etwas völlig Unbekanntes verbergen – neue Partikel, neue Symmetrien, vielleicht sogar neue Dimensionen der Raumzeit. Doch wie will man das herausfinden? In unseren Detektoren sehen exotische Teilchen zunächst ziemlich normal aus. Die Unterschiede sind klein und unauffällig. Erst mit der Unitaritätsmethode können wir die herkömmliche Physik so präzise beschreiben, dass das Ungewöhnliche heraussticht.

Zum Beispiel kam Joe Incandela von der University of California in Santa Barbara, der gegenwärtig als Sprecher des CMS-Experiments mehr als 2000 CERN-Physiker vertritt, mit folgendem Problem zu uns. Sein Team sucht nach den exotischen Teilchen, aus denen die rätselhafte Dunkle Materie im Universum besteht. Falls der LHC solche Partikel erzeugt, könnte der CMS-Detektor sie nicht direkt identifizieren, sondern bloß einen gewissen Energieschwund feststellen – doch der kann auch andere Gründe haben. Beispielsweise produziert der LHC häufig ein gewöhnliches Teilchen namens Z-Boson, das in einem Fünftel aller Fälle in zwei Neutrinos zerfällt. Auch diese verlassen wegen ihrer sehr schwachen Wechselwirkung den Detektor, ohne sich anders bemerkbar zu machen als durch einen scheinbaren Energieschwund. Die Frage ist: Wie lässt sich die Anzahl von Teilchen des Standardmodells vorhersagen, die sich im Detektor verhalten, als wären sie Partikel der Dunklen Materie?

Incandelas Gruppe machte einen Lösungsvorschlag: Man nehme die Anzahl der vom CMS-Detektor erfassten Photonen, schließe daraus auf die Anzahl der Ereignisse, bei denen Neutrinos entstehen, und prüfe, ob sie den Energieschwund restlos erklären. Andernfalls darf man schließen, dass der LHC Dunkle Materie erzeugt. Diese Idee ist typisch für die indirekten Schätzungen, auf welche die Experimentalphysiker immer dann angewiesen sind, wenn sie bestimmte Partikeltypen nicht direkt beobachten können. Doch dafür musste Incandelas Team präzise wissen, wie die Anzahl der Photonen mit jener der Neutrinos zusammenhängt; sonst versagt der Zugang durch die Hintertür.

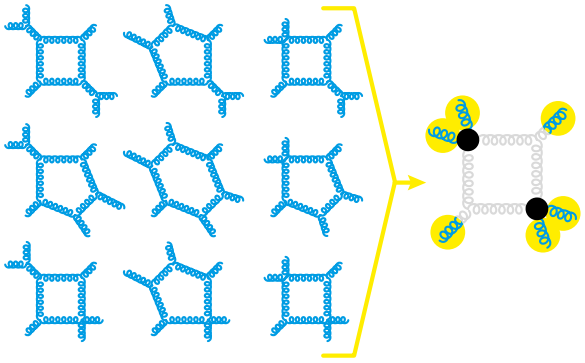
> »Mit unserer Methode können wir die herkömmliche Teilchenphysik so präzise beschreiben, dass **das Ungewöhnliche** heraussticht«

Wir untersuchten das Problem mit Hilfe unseres neuen theoretischen Werkzeugs und stellten damit fest, dass die Genauigkeit ausreichte. Nun konnte das CMS-Team auf seine Technik vertrauen und zuverlässige Bedingungen für Dunkle-Materie-Teilchen definieren – unsere Methode hatte sich bewährt.

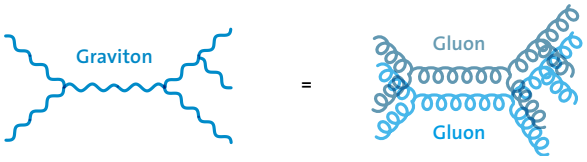
Dieser Erfolg ermutigte uns zu ehrgeizigeren Berechnungen. Wir arbeiten mit einer weltweiten Kollaboration von Teilchenphysikern zusammen, zu der Fernando Febres Cordero von der Simón-Bolívar-Universität in Caracas (Venezuela), Harald Ita von der Universität Tel Aviv (Israel), Daniel

Es geht auch einfacher

Die Autoren haben eine Alternative zu den Feynman-Diagrammen entwickelt – die Unitaritätsmethode. Sie nutzt Grundprinzipien der Quantentheorie, um mehrfache Feynman-Diagramme zusammenzufassen. Damit werden früher unmögliche Berechnungen durchführbar.



Die Methode hat physikalische Zusammenhänge aufgedeckt, die im Wust der Feynman-Diagramme versteckt lagen. Besonders überraschend: Es wird damit möglich, die Gravitation in die Beschreibung einzubeziehen. Die Partikel, welche die Gravitation übertragen – die Gravitonen –, zeigen auf einmal große Ähnlichkeit mit Gluonen. Mathematisch betrachtet verhält sich jedes Graviton wie zwei zusammengeschweißte Kopien eines Gluons.



ZVI BERN, LANCE J. DIXON, DAVID A. KOSOWER UND HARALD ITA

Mâitre von der Durham University (England), Stefan Höche vom Stanford Linear Accelerator Center in Menlo Park (Kalifornien) und Kemal Ozeren von der University of California in Los Angeles gehören. Gemeinsam machten wir exakte Vorhersagen für die Wahrscheinlichkeit, dass bei Kollisionen im LHC ein Neutrinopaar und vier Jets entstehen. Mit Feynman-Diagrammen würde diese Rechnung sogar ein großes Physikerteam überfordern, das zehn Jahre lang modernste Computer einsetzt. Mit der Unitaritätsmethode brauchten wir dafür weniger als ein Jahr. Unterdessen hat die Atlas-Kollaboration am LHC unsere Vorhersagen mit ihren Daten verglichen und beste Übereinstimmung festgestellt. Diese Resultate helfen den Forschern bei ihrer künftigen Suche nach neuen Teilchen.

Auch beim kürzlich erfolgten Nachweis des Higgs-Bosons spielte die Unitaritätsmethode eine wichtige Rolle. Ein Anzeichen für das Higgs ist die Erzeugung eines einzelnen Elektrons, zweier Jets und eines Neutrinos, wobei das Neutrino wiederum den Eindruck erweckt, Energie sei verloren gegangen. Das Gleiche kann aber auch bei Teilchenreaktionen entstehen, an denen kein Higgs beteiligt ist. Mit der Unitaritätsmethode berechneten wir die exakte Wahrscheinlichkeit dieser täuschenden Reaktionen.

Die störrische Schwerkraft

Sogar für ein Grundproblem der Physik verspricht die neue Vorgehensweise eine Lösung. Um eine völlig widerspruchsfreie Theorie aller Naturkräfte zu entwickeln, muss die Gravitation in einen quantenmechanischen Rahmen eingebaut werden. Die Quantenteilchen der Gravitation, die Gravitonen, sollten wie andere Partikel zusammenstoßen und gestreut werden. Dafür kann man im Prinzip Feynman-Diagramme zeichnen. Doch in den 1980er Jahren führten alle Versuche, die Gravitonenstreuung durch eine möglichst einfache Quantisierung der einsteinschen Theorie zu beschreiben, zu unsinnigen Resultaten – insbesondere zu unendlich großen Werten für endliche physikalische Größen. Das wäre an sich kein Problem: Auch im Standardmodell treten in den Rechnungen unterwegs Unendlichkeiten auf, doch am Ende heben sie sich auf. Bei der Gravitation schien das nicht zu funktionieren. Die Quantenfluktuationen der Raumzeit, vom amerikanischen Theoretiker John Wheeler (1911–2008) »Raumzeitschaum« getauft, geraten scheinbar völlig außer Rand und Band.

Eine mögliche Erklärung wäre, dass in der Natur unbekannte Teilchen vorkommen, welche die Quanteneffekte in Schranken halten. Diese Idee, die so genannte Supergravitation, wurde in den 1970er und 1980er Jahren intensiv erforscht. Das Interesse erlahmte, weil auch in dem Fall bei drei oder mehr virtuellen Teilchenschleifen unsinnige Unendlichkeiten auftauchten. Damit galt die Supergravitation als Fehlschlag.

Daraufhin wandten sich viele Theoretiker der Stringtheorie zu. Sie unterscheidet sich grundlegend vom Standardmodell. Partikel wie Quarks, Gluonen und Gravitonen sind nun nicht mehr winzige Punkte, sondern Schwingungen von eindimensionalen Saiten oder Strings. Die Wechselwirkungen zwischen den Teilchen konzentrieren sich nicht auf einen unendlich kleinen Punkt, sondern erstrecken sich über die Strings; das schließt Unendlichkeiten automatisch aus. Allerdings hat auch die Stringtheorie ihre Probleme; insbesondere macht sie keine eindeutigen Vorhersagen für beobachtbare Phänomene.

Heilsame Verdoppelung

Mitte der 1990er Jahre versuchte Stephen Hawking von der University of Cambridge die Supergravitation zu rehabilitieren. Er argumentierte, die früheren Berechnungen hätten unzulässige Abkürzungen genommen. Doch Hawking konnte niemanden überzeugen, denn für die Abkürzungen gab es gute Gründe: Die vollständigen Rechnungen waren hoffnungslos umständlich. Um wirklich zu wissen, ob ein Feynman-Diagramm mit drei virtuellen Gravitonschleifen unendliche Werte erzeugt, müsste man 10^{20} mathematische

Ausdrücke ausrechnen. Ein Diagramm mit fünf Schleifen liefert 10^{30} Terme – ungefähr einen Ausdruck für jedes Atom eines LHC-Detektors. Das Thema schien in den Papierkorb für unlösbare Probleme zu gehören.

Die Unitaritätsmethode hat die Situation völlig verändert und die Supergravitation praktisch rehabilitiert. Eine Rechnung, die nach der Feynman-Methode 10^{20} Terme lösen müsste, schaffen wir mit ein paar Dutzend Rechenschritten. Zusammen mit Radu Roiban von der Pennsylvania State University sowie mit John Joseph Carrasco und Henrik Johansson von der University of California in Los Angeles entdeckten wir, dass die Überlegungen aus den 1980er Jahren falsch waren. Vermeintlich unendliche Größen sind in Wirklichkeit endlich. Die Supergravitation erwies sich damit als nicht so unsinnig, wie die Physiker dachten. Das bedeutet konkret: Die Quantenfluktuationen der Raumzeit sind in der Supergravitation viel harmloser als früher angenommen. Wir möchten die kühne Spekulation wagen, dass eine Version dieser Theorie die lange gesuchte Quantengravitation darstellt.

»Die **Quantenfluktuationen von Raum und Zeit** sind in der Supergravitation viel harmloser als früher angenommen«

Besonders bemerkenswert: Drei Gravitonen wechselwirken miteinander genau wie je zwei Kopien von drei miteinander wechselwirkenden Gluonen. Diese Doppelkopie-Regel gilt anscheinend unabhängig davon, wie viele Teilchen gestreut werden oder wie viele virtuelle Teilchenschleifen beteiligt sind. Das bedeutet, dass die Gravitation gleichsam das Quadrat der starken Kraft darstellt. Wir sind noch dabei, die abstrakte Mathematik in konkrete Physik zu übersetzen und zu prüfen, ob das unter allen Bedingungen gilt. Auf jeden Fall scheint sich die Gravitation wohl gar nicht so sehr von den anderen Naturkräften zu unterscheiden.

Ist die Supergravitation völlig frei von Unendlichkeiten? Oder zähmt ihre hochgradige Symmetrie nur einige ihrer Exzesse, solange wenige Schleifen im Spiel sind? Im letzteren Fall sollten bei fünf Schleifen Probleme auftauchen; von sieben Schleifen an würden die Quanteneffekte so stark, dass Unendlichkeiten entstünden. Bislang haben wir immerhin eine Wette unter Kollegen gewonnen, dass die Methode nicht nur für drei, sondern auch für vier Schleifen funktioniert. Der Teilchenphysiker und Stringtheoretiker David Gross (Nobelpreis 2004) von der University of California in Santa Barbara setzte nun eine Flasche kalifornischen Zinfandel darauf, dass bei sieben Schleifen Unendlichkeiten auftreten. Um diese zweite Wette zu entscheiden, haben einige von uns neue Rechnungen begonnen. Ein Sieg würde die Skeptiker vielleicht endgültig überzeugen, dass die Supergravitation widerspruchsfrei ist. Doch selbst dann erfasst die Theorie andere Effekte nicht; diese so genannten nichtstörungstheoretischen Beiträge sind so winzig, dass sie in unserem Ansatz nicht vorkommen. Für sie mag eine noch tiefgründigere Theorie zuständig sein – vielleicht die Stringtheorie.

Physiker stellen sich gern vor, dass neue Theorien aus den kühnen Pinselstrichen neuer Grundprinzipien hervorgehen – Relativitätstheorie, Quantenmechanik, Symmetrie. Doch manchmal entstehen solche Theorien auch durch sorgfältiges Überprüfen schon bekannter Prinzipien. Auf Grund einer stillen Umwälzung der Ansichten über Teilchenkollisionen können wir jetzt feine Details des Standardmodells herausarbeiten und vermögen in neues physikalisches Terrain vorzudringen. Zusätzlich entdecken wir dabei einen vernachlässigten Aspekt der alten Physik, der uns einen überraschenden Weg zur Vereinigung der Gravitation mit den anderen Kräften weist. In dieser Hinsicht gleicht der Versuch, die Geheimnisse der Teilchenstreuung zu lösen, nicht einer U-Bahnfahrt mit bereits vorgegebenem Ziel, sondern dem Aufbruch zu einer Reise voll unvorhergesehener Wendungen. ~

DIE AUTOREN

Zvi Bern (links) ist Physikprofessor an der University of California in Los Angeles. **Lance J. Dixon**, (Mitte) Professor am Stanford Linear Accelerator Center in Menlo Park (Kalifornien), verbrachte 2011 ein akademisches Jahr am europäischen Forschungszentrum CERN bei Genf und beriet die Experimentalphysiker in der Anwendung der in diesem Artikel beschriebenen Theorien. **David A. Kosower** ist leitender Wissenschaftler am Forschungszentrum Saclay des französischen Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives.

QUELLEN

Berger, C. F. et al.: Precise Predictions for W+4 Jet Production at the Large Hadron Collider. In: Physical Review Letters 106, Nr. 9, 2011
Blau, S. K.: Lovely as a Tree Amplitude: Hidden Structures Underlie Feynman Diagrams. In: Physics Today 57, S. 19–21, 2004
Kaiser, D.: Physics and Feynman's Diagrams. In: American Scientist 93, S. 156–165, 2005
Stelle, K.: Supergravity: Finite after All? In: Nature Physics 3, S. 448–450, 2007

LITERATURTIPP

Feynman, R. P.: QED: Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie. Piper, München 1992
Der Schöpfer der Feynman-Diagramme erläutert, wie sie in der Quantenelektrodynamik funktionieren.

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1157698**

Farbenschillernder Nebel

Die Natur muss erst einmal Wassertröpfchen nach Größe sortieren, damit wir Farbeffekte in Nebelfahnen beobachten können.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

> Aber als ich den Tee aufgoss,
> waren schon die Möglichkeiten,
> ungeheuer, wieder vergessen;
> im quirlenden Dampf verfing
> sich mein Blick, bis er verschwand, ...
>
> *Henning Ziebritzki (*1961)*

ALLE FOTOS DER DOPPELSEITE (SOFERN NICHT ANDERS ANGEGEBEN): H.-J. SCHLICHTING

Die zumeist weißen Nebelschwaden über einer Tasse heißem Tee werden unter bestimmten Umständen zeitweise von feinen Farbsträhnen durchwirkt.

Stellen Sie sich vor, Nebel liegt über dem Land. Myriaden winziger Wassertröpfchen, 10, 20 oder 50 Millionstel Meter groß, schweben in der Luft und streuen Sonnenlicht verschiedenster Wellenlängen in alle Richtungen. Das Ergebnis ist eine triste, grauweiße Lichtmischung; jegliche Farbe der Landschaft scheint verschluckt.

Anders ist es, wenn sich Nebel in größeren Höhen unter weit gehend einheitlichen Bedingungen bildet. Dann besteht er aus etwa gleich großen Tröpfchen. Werden solche dünnen Wolken schließlich von Sonnen- oder Mondlicht durchquert, kann es zu eindrucksvollen Koronen kommen, also zu farbigen Ringsystemen, welche die leuchtenden Himmelskörper umgeben (siehe »Weihnachtliche Krönung«, SdW 12/2009, S. 35).

Um solche Phänomene zu sehen, müssen Sie gar nicht warten, bis sich am Himmel etwas tut. Wenn Sie bei tief stehender Sonne, etwa am frühen Morgen, auf Ihrer Terrasse heißen Tee oder Kaffee trinken und in die von der Tasse aufsteigende, lichtdurchflutete Nebelfahne blicken, können Sie auch darin Fetzen farbigen Lichts entdecken (Foto links). Noch bunter geht es auf der Oberfläche des Getränks zu (rechts unten).

Diese farbigen Erscheinungen sind keineswegs selbstverständlich, schließlich setzen sie gleiche Tröpfchengrößen voraus. Schauen wir uns also genauer an, was passiert. Dass sonnenbeschienene Wassertröpfchen weißes Licht in Farbringe zerlegen, wird Sie nicht verwundern. Denn die winzigen Tröpfchen beugen das auftreffende Licht. Man kann sich das so vorstellen, dass eine Lichtwellenfront einer bestimmten Frequenz am Rand eines Tropfens neue Lichtwellen auslöst – so genannte Elementarwellen –, die sich dann in unterschiedliche Richtungen ausbreiten.

Überlagern sich zwei von unterschiedlichen Punkten eines Tropfens kommende Lichtwellen auf der Netzhaut des Auges oder auf dem Sensor der Kamera, haben sie im Allgemeinen einen geringfügig unterschiedlichen Weg zurückgelegt. Die Folge ist eine so genannte Phasendifferenz: Wellenberge und Wellentäler sind gegeneinander verschoben. Je nach Größe der Phasendifferenz können sich die Wellen verstärken oder auch auslöschen. Im ersteren Fall werden die zugehörigen Farben verstärkt, im letzteren verschwinden sie. So oder so entsteht durch diese Interferenz farbiges Licht.

Die ringförmige Struktur der Farben verdankt sich dabei der Kugelsymmetrie der Tröpfchen. Man kann sich für jede Farbe oder Wellenlänge einen Kegel vorstellen, dessen Spitze in unser Auge weist. Licht einer bestimmten Wellenlänge wird dann von allen Tröpfchen aus, die auf dem Kegelmantel sitzen, in das Auge gelangen, so dass wir einen farbigen Kreis wahrnehmen. Doch nur dann, wenn viele ungefähr gleich große Tröpfchen von weißem Licht durchstrahlt werden, addieren sich die Intensitäten des gebeugten Lichts, und es entsteht tatsächlich ein gut sichtbares Ringsystem – sonst bleibt der Nebel grau.

In den turbulenten Nebelschwaden über dem Tee verändern sich die Farbsträhnen ständig. Einheitliche Be-

Konvektionsvorgänge in der Flüssigkeit lassen schwebende Tröpfcheninseln entstehen. Die Größe der Tröpfchen darin ist mehr oder weniger identisch – Voraussetzung dafür, dass die Inseln in bunten Farben schimmern.

Die Farbstreifen in den Tröpfcheninseln sind in ständiger Bewegung, weil die Tröpfchen durch Luftbewegungen immer wieder verwirbelt werden.

WILFRIED SUHR

Um das an der Flüssigkeit reflektierte Sonnenlicht bildet sich eine Korona, wenn man die Tasse aus etwas größerem Abstand betrachtet.

dingungen, unter denen sich gleich große Tröpfchen bilden könnten, liegen ganz offensichtlich immer nur kurzfristig vor. Anders ist es bei den Tröpfchen, die schwebende Inseln über der Oberfläche des Tees formen (oben). Denn dank eines subtilen Selektionsprozesses besitzen sie alle etwa dieselbe Größe.

Wassertröpfchen werden in der Schwebe gehalten

Dieser Prozess verläuft so: An der Grenze zwischen heißer Wasseroberfläche und vergleichsweise kalter Luft bildet sich Wasserdampf und steigt so schnell auf, dass die Strömung schon in geringer Höhe turbulent wird. Grund für die starke Beschleunigung der Moleküle ist vor allem die Wärme, die frei wird, wenn ein Teil des heißen Dampfs in der kälteren Luft gleich wieder zu winzigen Wassertröpfchen kondensiert. Diese werden dann als Nebel sichtbar und helfen uns, die schnelle Bewegung des unsichtbaren Dampfs zumindest indirekt zu verfolgen.

Normalerweise entstehen die Tröpfchen in unterschiedlichen Größen. Die größeren und damit schwereren fallen sofort wieder in das Getränk zurück, die kleineren entweichen in den sichtbaren Nebelfahnen. Dazwischen gibt es Tröpfchen, die genau das richtige Gewicht haben, um von dem aufsteigenden Dampfstrom getragen und in der Schwebe gehalten zu werden.

Diese treibenden Tröpfcheninseln sorgen nicht nur für die beeindruckenden Farben, sondern verraten uns auch etwas über die Dynamik an der Oberfläche des Getränks. Denn sie sind voneinander durch schmale Grenzbereiche getrennt, durch die wir direkt die dunkle Oberfläche des Tees sehen. Die Tröpfcheninseln schweben nämlich genau über jenen Oberflächenbereichen, in denen heiße Flüssigkeit aufsteigt, sich abkühlend zu den Rändern hinbewegt und schließlich – kühler, also wieder schwerer geworden – erneut absinkt. Sie reichen also nur bis zu jenen Orten, über denen mangels Wärmeenergie kein Dampf und damit auch kein Nebel mehr entsteht.

Noch verstärkt wird diese Konvektion übrigens durch die mit der Temperatur variierende Oberflächenspannung. Heißes Wasser besitzt eine geringere als kaltes; es kann also energetisch günstiger sein, die kühlere Oberfläche durch eine heißere zu ersetzen. Auch aus diesem Grund breitet sich die aufsteigende heiße Flüssigkeit in Richtung auf die kühlen Ränder aus.

Am Ende unternehmen wir noch ein kleines Experiment mit unserer Teetasse. Lassen wir das Sonnenlicht so auf die Oberfläche des Tees fallen, dass es eine möglichst ausgedehnte Tröpfcheninsel durchstrahlt, und blicken aus etwas größerem Abstand darauf (oben rechts). So wird die Verwandtschaft des Farbenspiels über dem Tee mit den Lichterscheinungen um Sonne und Mond offensichtlich, denn jetzt setzen sich auch die vereinzelten Farbfetzen über dem Tee zu einer veritablen Korona zusammen.

Eine Korona mit ausgeprägten Ringstrukturen kann sich auch dann zeigen, wenn man eine entfernte Lichtquelle durch eine mit kleinen Wassertröpfchen beschlagene Scheibe betrachtet. Die dunkle Sprenkelung ist Folge der Materialstruktur der Scheibe.

DER AUTOR

H. Joachim Schlichting war bis 2011 Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. 2008 erhielt er für seine didaktischen Konzepte den Pohl-Preis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.

LITERATURTIPP

Suhr, W., Schlichting, H.J.: Quételet's Fringes Due to Scattering by Small Spheres Just Above a Reflecting Surface. In: Applied Optics 48, S. 4978–4984, 2009

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1157703

ESSAY

Komplexität und Emergenz

Zwei riskante Begriffe: Sie dienen der kompakten Beschreibung unübersichtlicher Systeme und ihres oft sprunghaften Verhaltens. Doch dabei läuft man Gefahr, die Zusammenhänge zu vernebeln. Ein Beispiel aus der Physik könnte zur Klärung beitragen.

Von Michael Springer

> **»Je näher man ein Wort ansieht,**
> **desto ferner sieht es zurück«**
>
> ***Karl Kraus***

Von einem Augenblick zum anderen verlor einer meiner Freunde vor einiger Zeit fast völlig seine kognitiven Fähigkeiten. Sprachlos schaute er um sich wie ein Raumfahrer in einem Sciencefiction-Roman, der plötzlich auf einen fremden Planeten gebeamt worden ist, oder wie ein Säugling im Kinderwagen, der die großen Köpfe grinsender Erwachsener anstarrt, die sich bedrohlich nähern.

Mein Freund litt an Herpes-Enzephalitis. Monatelang verlor er einen Großteil seines Gedächtnisses und der Sprechfähigkeit. Heute, da er sich fast vollständig erholt hat, spricht er von jener Zeit als einer vollkommenen Leere, einem traumlosen Schlaf, aus dem er plötzlich erwachte. Anscheinend lebte er während seiner Krankheit nur im Hier und Jetzt, ohne Vergangenheit oder Zukunft. Seine kognitiven Fähigkeiten muteten geringer an als die von vielen Tieren. Wenn er eine Mahlzeit bekam, schien er zu überlegen, was er damit anfangen sollte; einige Zeit lang musste man ihn füttern. Nur seine Reflexe funktionierten: Er öffnete seinen Mund für den sich nähernden Löffel, und er schluckte das Essen.

AUF EINEN BLICK

ÜBERRASCHENDE NEUE EIGENSCHAFTEN

1 Auf den ersten Blick ist die Welt verwirrend komplex. Mit Modellen versuchen Wissenschaftler, die **Komplexität zu reduzieren**. Dabei erweisen sich unterschiedliche Beschreibungsebenen als nützlich – etwa die statistische Betrachtung von Gasatomen, um makroskopische Wärmephänomene zu erklären.

2 Beim Wechsel zwischen den Ebenen tauchen – durch so genannte **Emergenz** – oft ganz neue Eigenschaften auf. So hat die Zeit in der statistischen Thermodynamik eine Richtung, während die Bewegung jedes einzelnen Atoms reversibel abläuft.

3 Komplexität und Emergenz sind sehr allgemeine **Systemeigenschaften**, die aber für sich genommen noch nichts erklären.

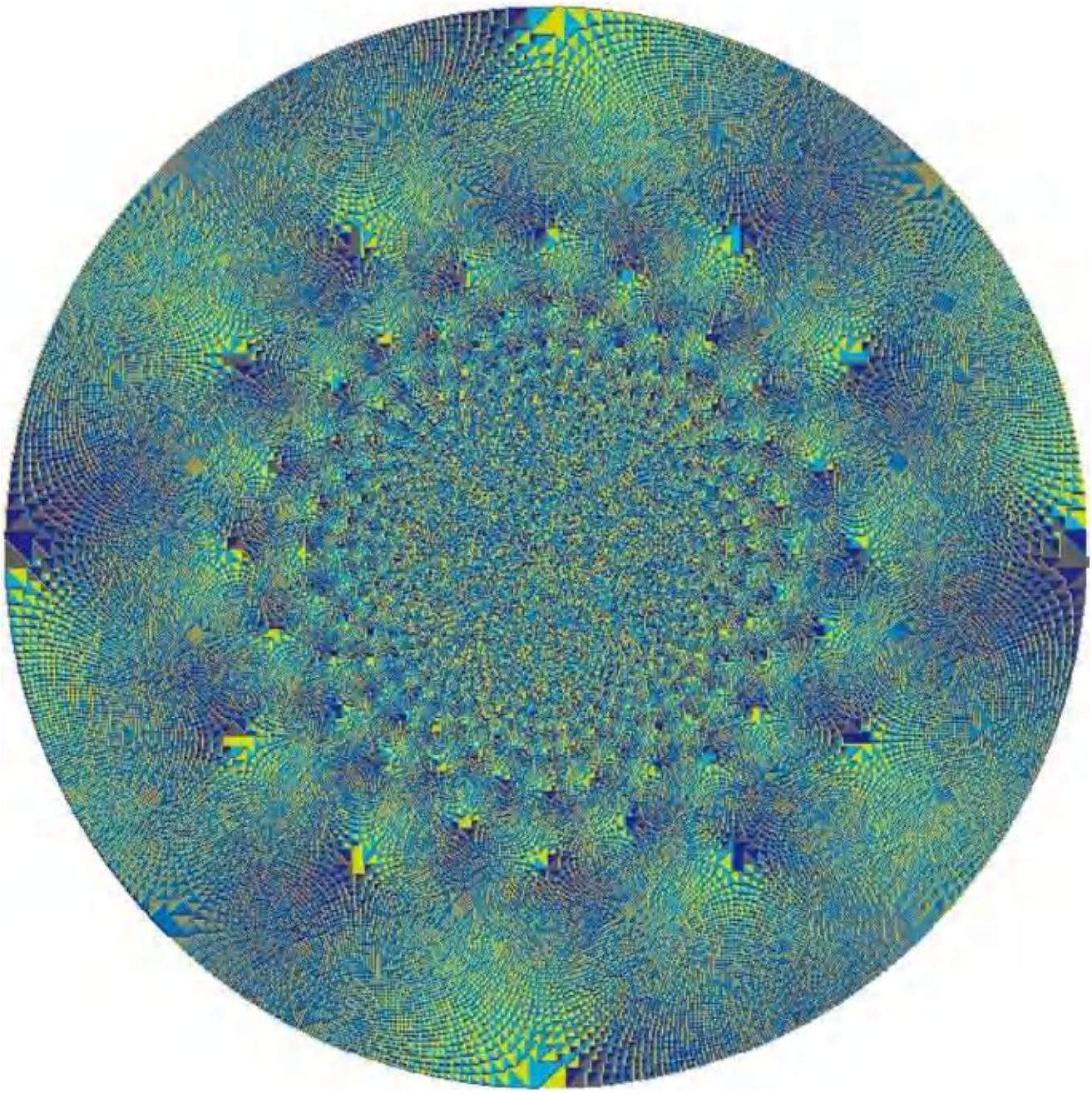
Simplify your Life!

In gewisser Weise vereinfachte die Enzephalitis das Leben meines Freundes radikal; sie reduzierte es auf elementare Tatsachen ohne Struktur, das heißt ohne die geringste Komplexität. Vielleicht umfasste seine Erfahrung wenigstens ein paar kurzlebige separate »Dinge« wie Löffel, fremde Personen und trinkbare Flüssigkeiten, aber diese Objekte waren nicht hierarchisch strukturiert. Statt eine Welt als ein komplexes Gebäude mit vielen Stockwerken zu bilden, lagen sie umher wie lauter Ziegel auf einer grenzenlosen Ebene.

Was meinem Freund sichtlich fehlte, war die Gabe der Erinnerung. In »Der logische Aufbau der Welt« versuchte der logische Empirist Rudolf Carnap (1891–1970) im Jahr 1928, die Welt aus möglichst einfachen Bausteinen zu rekonstruieren – aus »Elementarerlebnissen« und einer einzigen »Ähnlichkeitsrelation«. Mein Freund war während seiner Krankheit sicher nicht fähig, auf diese Weise eine strukturierte Welt aufzubauen; da sein Gedächtnis nicht richtig arbeitete, konnte er keine kohärenten Ähnlichkeiten zwischen seinen Erfahrungen etablieren.

Doch in einem praktischen Sinn wurde das Leben meines Freundes durch das Fehlen eines ähnlichkeitsbildenden Gedächtnisses immens kompliziert. Allein gelassen wäre er gestorben. Er brauchte Hilfe: Die komplizierten Handlungen von Ärzten, Krankenpflegern und Freunden mussten die fehlende Komplexität seiner strukturell »flachen« Welt ausgleichen.

Übrigens entspricht diese Situation ziemlich genau derjenigen eines buddhistischen Bettelmönchs, der völlige Erleuchtung erreicht hat. Ihm erscheinen alle Lebenstatsachen als gleichermaßen (un)wichtig; er bleibt untätig und überlebt nur, solange Mitmenschen ihn mit Kleidung und Nahrung versorgen.



MIT FRDL. GEN. VON JAMES PROPP UND ED PEGG JR (MATHPUZZLE.COM)

Die »Goldbug-Variationen« führen vor, wie aus einer einfachen Regel eine überraschend komplexe Struktur entstehen kann. Denken Sie sich ein feines Quadratgitter in der Ebene; zu jedem Quadrat gehört ein winziger Wegweiser, wobei anfangs alle ostwärts zeigen. Nun werden im Zentrum nacheinander zahlreiche Käfer (»bugs«) ausgesetzt. Jeder Käfer dreht dort den Wegweiser um 90 Grad gegen den Uhrzeigersinn, folgt der Richtung zum nächsten Gitterpunkt, tut dort das Gleiche und so weiter – bis er auf dem ersten freien Platz zur Ruhe kommt. Mit der Zeit entsteht ein kompliziert gemusterter Kreis; die Farben bezeichnen Stellungen der Wegweiser.

Entgegen der Wortbedeutung macht Komplexität die Dinge also im täglichen Leben einfacher. Wir brauchen sie, um unser praktisches Wissen zu organisieren und zu simplifizieren. In den meisten Fällen wäre es unnötig – und würde bloß Verwirrung stiften –, sämtliche elementaren Aspekte der Dinge, mit denen wir hantieren, im Auge zu behalten. Wir strukturieren unsere Erfahrung, indem wir Modelle konstruieren, die so einfach sind wie möglich und so komplex wie nötig. Bei dem Versuch, sie anzuwenden, wissen wir: Jedes Modell, so komplex es auch sein mag, ist weniger kompliziert als die Wirklichkeit, der es gerecht zu werden versucht – wahrscheinlich unendlich viel weniger.

Wir könnten dies mit dem Satz ausdrücken: »Die Realität ist unendlich komplex.« Diese scheinbar metaphysische Aussage ist in der Tat ganz sinnvoll. Sie bedeutet einfach erstens, dass jedes praktikable Modell weniger komplex sein

PUBLIC DOMAIN

Der Positivist Ernst Mach ließ nur Sinneseindrücke als Grundlage empirischen Wissens gelten. Für ihn waren deshalb Atome nicht real, sondern hatten bloß als »denkökonomische« – Komplexität reduzierende – Gedankenkonstruktionen eine gewisse Berechtigung.

muss als die Dinge, die es modelliert; und zweitens, dass niemand vorher wissen kann, ob und wann dieses Modellbauen je zu einem Ende kommen wird. Somit reduziert jedes komplexe Modell die reale Komplexität, vereinfacht dadurch die Dinge und erleichtert das Leben.

Komplexitätsreduktion in der Wärmelehre

Vor erstaunlich kurzer Zeit debattierten die Physiker noch, ob es überhaupt Atome gibt. Der österreichische Philosoph und Physiker Ernst Mach (1838–1916) war beispielsweise ein überzeugter Positivist und Sensualist. Er glaubte nur an »positive« – empirisch bestätigte – Sinnesdaten und betrachtete jede Aussage über Dinge, die sich jenseits unserer Anschauung in einer objektiven Realität aufhalten sollen, als pure Metaphysik, das heißt Unsinn. Da sich zu seiner Zeit niemand ein Mikroskop vorstellen konnte, das einzelne Atome sichtbar macht, wurde er unweigerlich wütend, wenn jemand Atome erwähnte, und pflegte zu höhnen: »Ham's eins g'sehn?«

Machs Landsmann und Kollege Ludwig Boltzmann (1844–1906) war hingegen überzeugter Atomist und Mitbegründer der statistischen Thermodynamik, einer Theorie der Wärme, die von atomaren Bewegungen ausgeht.

Wie gesagt – damals war es unmöglich, einzelne Atome zu beobachten, geschweige denn ihre Orte und Geschwindigkeiten zu messen. Heutzutage könnten wir das im Prinzip erreichen. Doch selbst kleine makroskopische Objekte oder Gasmengen enthalten so viele Atome, dass nicht einmal ein moderner Supercomputer sie alle zu verfolgen vermag. Es ist aber auch gar nicht nötig, sämtliche einzelnen mikroskopischen Teilchen zu beobachten, um zu beschreiben, wie sich das makroskopische Objekt verhält, das aus ihnen besteht. Wenn Wasser auf dem Herd steht, bewegen sich die Wassermoleküle immer rascher, und die schnellsten entkommen als Dampf. Im Alltag halten wir uns – genau wie die Experimentalphysiker zu Zeiten Machs und Boltzmanns – nicht damit auf, einzelne Wasserpartikel zu beobachten. Wir messen einfach mit dem Thermometer, dass das Wasser sich erwärmt, und wir können zusehen, wie es zu verdampfen beginnt und schließlich bei 100 Grad Celsius kocht.

Mit der Theorie der Thermodynamik machten Physiker wie Boltzmann gewissermaßen aus der Not unseres mangelnden Wissens über das Schicksal jedes einzelnen Atoms in einem Gas eine Tugend, indem sie große Teilchenmengen statistisch beschrieben. Was bedeutet Temperatur? Sie ist ein Maß für die mittlere kinetische Energie der Teilchen: Je höher diese Energie, desto wärmer das Gas, und umgekehrt. Was ist Druck? Die Kraft der Teilchen (pro Flächeneinheit), welche die Wand des Gasbehälters bombardieren. So entsteht oder »emergiert« der makroskopische Zustand eines Systems – charakterisiert durch Volumen, Temperatur und Druck – aus der statistischen Beschreibung des mikroskopischen Systemzustands, der durch Ort und Geschwindigkeit jedes Einzelteilchens definiert ist.

Und was ist mit der Entropie, dem faszinierendsten Begriff der Thermodynamik? Die Wärmelehre, die zunächst zur Beschreibung der Dampfmaschine, des Motors der industriellen Revolution, diente, hatte die Entropie als ein Maß für die Dissipation der thermischen Energie eingeführt: Wenn wir Wärme verwenden, um Bewegung zu erzeugen, zum Beispiel einen Motor anzutreiben, geht unweigerlich ein Teil der Wärmeenergie an die Umgebung verloren. Die Entropie nimmt damit zu.

Doch nun definierte Boltzmann die Entropie atomistisch – als den Logarithmus der Anzahl aller mikroskopischen Zustände eines Systems, die denselben makroskopischen Zustand ergeben. Somit besagt die Entropie, wie viele unterschiedliche Konfigurationen sämtlicher winzigen Teilchen als makroskopisch gleich zu betrachten sind, da sie ein und demselben Gesamtzustand des Systems entsprechen. Zum Beispiel würde es keinen Unterschied machen, wenn wir zwei Gaspartikel vertauschten und jedes sich wie das jeweils andere verhielte. Ganz allgemein könnten wir die Orte und Geschwindigkeiten mehrerer Teilchen auf viele subtile Arten so verändern, dass das Gesamtbild nicht beeinflusst würde. Der Logarithmus der Anzahl all dieser mikroskopischen Möglichkeiten ergibt die Entropie des großen Systems. Dass wir hier den Logarithmus einsetzen und nicht die Anzahl selbst, hat technische Gründe. Er garantiert, dass die Entropie sich additiv verhält: Die Gesamtentropie eines Systems,

PUBLIC DOMAIN

In seinem Werk »Der logische Aufbau der Welt« versuchte der Philosoph Rudolf Carnap, den gesamten Gegenstandsbereich der Naturwissenschaften aus elementaren Sinneserlebnissen und einer einzigen Relation zu konstruieren – der Ähnlichkeit zwischen Elementarerlebnissen. Diese Basis erwies sich aber als zu schmal für die wissenschafliche Praxis.

das aus zwei Teilen zusammengefügt wird, ist die Summe der Entropien der Teilsysteme.

Diese abstrakte Definition der Entropie wird oft als »Unordnung« veranschaulicht: Das Wachstum der Entropie entspricht wachsender Unordnung. Beispielsweise kann ein homogen verteiltes Gas, das ein Volumen im thermischen Gleichgewicht erfüllt, viel mehr mikroskopisch äquivalente Zustände haben als dasselbe Gas, wenn es in einer Ecke desselben Volumens konzentriert ist oder eine Geschwindigkeitsverteilung fern vom Gleichgewicht besitzt. Im ersteren Fall sind Entropie und »Unordnung« hoch, im letzteren niedrig.

PUBLIC DOMAIN

Der Physiker Ludwig Boltzmann entwickelte eine Theorie der Wärme, die auf der statistischen Beschreibung mikroskopischer Atombewegungen beruhte. Insbesondere seine Deutung der Entropie war seinerzeit umstritten, weil sie den Zeitpfeil aus der Statistik reversibler Prozesse herleitete.

Die Emergenz der Zeit

Oben wurde en passant behauptet, dass der makroskopische Systemzustand aus mikroskopischen Zuständen »emergiert« – soll heißen daraus entsteht, auftaucht oder herauskommt, eben durch so genannte Emergenz. Soweit es die makroskopischen Größen Volumen, Temperatur und Druck betrifft, mutet deren Emergenz freilich eher primitiv an: Eine riesige Anzahl von mikroskopischen Größen wird statistisch zu drei Makrogrößen komprimiert. In diesem Fall reduziert die Emergenz die Komplexität des Verhaltens vieler Atome dadurch, dass sie deren Durchschnittsverhalten charakterisiert – aber ist das nicht eine enttäuschende Transformation? Unter Emergenz versteht man in der Regel etwas, das komplexe Phänomene nicht bloß vereinfacht, sondern auch Neues erzeugt; Emergenz sollte aus einem komplexen System nach gängigem Verständnis »mehr als die Summe seiner Teile« machen, nicht weniger!

Zu Gunsten der »emergenten« Größen Volumen V, Temperatur T und Druck p könnte man immerhin anführen, dass sie der makroskopischen Zustandsgleichung für ideale Gase $p \cdot V = \text{const.} \cdot T$ genügen, welche sich mit Hilfe der oben erwähnten statistischen Interpretation dieser Größen leicht auf die Stoßbewegungen mikroskopischer Gaspartikel zurückführen lässt. Doch das echte Wunder der Emergenz wird erst durch die Entropie vollbracht. Bekanntlich hängt diese makroskopische Größe nicht nur mit der Unordnung eines Zustands zusammen, sondern vor allem mit seiner Wahrscheinlichkeit: Je mehr mikroskopische Zustandsmöglichkeiten ein makroskopischer Zustand birgt, desto wahrscheinlicher ist er. In jedem sich selbst überlassenen System ist Unordnung wahrscheinlicher als Ordnung; darum tendieren abgeschlossene Systeme von Natur aus zu Unordnung und höherer Entropie.

Diese Entwicklungsrichtung – ausgedrückt im Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, der postuliert, dass die Entropie abgeschlossener Systeme niemals abnimmt – erzeugt in der Tat etwas Neues: Sie führt in die Physik den Zeitpfeil ein. Die Tatsache, dass Vergangenheit und Zukunft nicht das Gleiche sind, »emergiert« aus der statistischen Beschreibung komplexer Mikrosysteme.

Das ist wirklich bemerkenswert. Der Fortgang der Zeit emergiert aus der Statistik! Als Boltzmann seine Theorie formulierte, schüttelten prominente Kollegen den Kopf. Bleiben nicht alle physikalischen Grundgleichungen unverändert, wenn man die Zeitrichtung umkehrt? Der Lauf der Planeten, die Wurfbahn eines Steins, die Kollision von Billardkugeln – all das kann sich zeitlich umgekehrt entwickeln, ohne ein physikalisches Gesetz zu verletzen. Sämtliche mikrophysikalischen Wechselwirkungen der Gaspartikel, wenn man sie sich vereinfacht als winzige Billardkugeln vorstellt, sind reversibel; aber als statistisches Ensemble benehmen sie sich irreversibel!

Kein Wunder, dass das für Boltzmanns Zeitgenossen schwer zu verdauen war. Durch eine statistische Beschreibung, welche die komplexen Interaktionen unzähliger Partikel radikal vereinfacht, emergiert unsere sich irreversibel von der Vergangenheit zur Zukunft entwickelnde Makrowelt aus einer ganz und gar reversiblen Mikrowelt. Wenn wir dieses innerphysikalische Beispiel kühn verallgemeinern, können wir nun Emergenz definieren als die Erzeugung einer qualitativ neuen Eigenschaft durch Reduktion von Komplexität.

Wie das Beispiel illustriert, liegt die emergente Eigenschaft näher bei unserer konkreten Alltagserfahrung als das System, aus dem sie entsteht. Unser Leben geht zeitlich vor sich; wir erinnern uns an die Vergangenheit und wissen nicht, was die Zukunft bringen mag. Vor unseren Augen spielen sich niemals vollkommen reversible Prozesse ab; sie sind Abstraktionen, Idealisierungen. Philosophisch gesprochen – und angelehnt an eine Bemerkung von Karl Marx (1818–1883) aus seiner »Einleitung zur Kritik der Politischen Ökonomie« über den Fortgang des Wissens über komplexe Wirtschaftssysteme – können wir formulieren: Emergenz steigt auf vom Abstrakten zum Konkreten.

Wie real ist die Emergenz?

Was könnte realer sein als eine »konkrete« Tatsache der Alltagserfahrung wie der Zeitpfeil? Doch da emergente Eigenschaften aus der Reduktion komplexer Systeme hervorgehen, könnte man umgekehrt argumentieren, nur diese komplexen Systeme seien real, die Emergenz hingegen nicht. Das wäre der radikal reduktionistische Standpunkt. In der Tat

THE NOBEL FOUNDATION

Der Chemiker Ilya Prigogine (Nobelpreis 1977) zog weit reichende Folgerungen aus seinen Forschungen über die Thermodynamik komplexer Systeme fern vom Gleichgewicht. Er postulierte einen Paradigmenwechsel der Physik »vom Sein zum Werden«.

betrachten theoretische Physiker, die sich mit Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie befassen und sie mit der Quantenmechanik zu einer »Theorie von Allem« namens Quantengravitation vereinen möchten, die Zeit bloß als die vierte Koordinate der Raumzeit; sie beschreiben die Welt als ein vierdimensionales »Blockuniversum«, das einfach da ist. Was wir als Entwicklung erleben, ist das, was geschieht, wenn wir uns längs der Zeitkoordinate bewegen; in der Realität als Gesamtheit steht alles für immer fest. In diesem Sinn betrachtete schon Einstein die Zeit als Illusion.

Paradoxerweise neigen wir dazu, eine Tatsache des Lebens umso mehr als »Illusion« zu betrachten, je besser wir die betreffende Tatsache verstehen, das heißt, je mehr wir sie als emergent zu erklären vermögen. Das ist seit Kurzem bei Bewusstseinsphänomenen der Fall; offensichtlich beruht die reduktionistische Deutung mentaler Phänomene auf dem Fortschritt von Hirnforschung und Neurowissenschaft. Wenn in den berühmten Experimenten des amerikanischen Physiologen Benjamin Libet (1916–2007) die Versuchsperson beschließt, zu einem bestimmten Zeitpunkt einen Finger zu bewegen, während zugleich ihre Hirntätigkeit zeitlich genau verfolgt wird, so reduziert dies den Entscheidungsprozess auf neurophysiologische Wechselwirkungen – und unser »freier Wille« scheint als Illusion entlarvt zu werden. Bekanntlich fand Libet, das Gehirn werde sogar schon vor der bewussten Entscheidung des Probanden aktiv, doch dieses umstrittene Resultat verschärft nur noch die reduktionistische Wirkung derartiger Experimente.

Aber warum sollte es nötig sein, einen Begriff als »bloße Illusion« über Bord zu werfen, nur weil er sich wissenschaftlich erklären lässt – was eben stets bedeutet: Er kann auf etwas anderes reduziert werden? Wir sprechen weiterhin von Temperatur, obwohl wir wissen, dass es sich »nur« um atomare Zufallsbewegungen handelt; wir beschreiben und analysieren Gedanken und andere Bewusstseinsphänomene, obwohl sie »nichts als« neuronale Interaktionen sind; wir schätzen Lieder über Sonnenauf- und -untergänge, obwohl seit Jahrhunderten bekannt ist, dass die Bewegung der Sonne eine von der Erdrotation erzeugte Illusion ist.

Beispielsweise ist der »freie Wille« ein intuitiv überzeugendes, obgleich philosophisch seit jeher umstrittenes Konzept: eine ursachenlose Ursache für spontanes Handeln. Indem die Wissenschaft den physiologischen Hintergrund von bewussten Entscheidungen untersucht, zerstört sie das Konzept von absoluter Freiheit. In diesem Sinn erweist die Forschung den freien Willen als Illusion. Doch daraus folgt nicht, dass wir für unsere Taten nicht verantwortlich sind. Die Feststellung, dass alles, was wir entscheiden und tun, Ergebnis mikroskopischer – atomarer, chemischer, physiologischer – Prozesse ist, umschreibt ganz zu Recht den Bereich der einschlägigen Wissenschaften, aber davon abgesehen ist diese Aussage leer, unpraktisch, geradezu metaphysisch. Sie beschreibt nicht, geschweige denn erklärt das hochgradig emergente Phänomen, wie eine Person sich in einem moralischen Dilemma zwischen Richtig und Falsch oder »Gut« und »Böse« entscheiden muss.

Wie oben postuliert, ist die Realität komplex, sogar unendlich komplex. Doch daraus folgt nicht notwendig, dass jede Reduktion von Komplexität weniger real sein muss. Sie kann mehr oder weniger angemessen sein. Wir erkennen eine erfolgreiche Reduktion daran, dass sie einen traditionellen, vielleicht sogar vorwissenschaftlichen Begriff adäquat wiedergibt. Dieser mag seit unvordenklichen Zeiten in Gebrauch sein, wurde aber nie zuvor als emergente Qualität erkannt. Bei diesem Erkenntnisvorgang wird der traditionelle Begriff expliziert – das heißt erklärt, reduziert und modifiziert. Oft wird eine solche Neuinterpretation nicht gleich akzeptiert. Es kann Jahrzehnte oder gar Jahrhunderte dauern, bis sie sich etabliert hat, wie das bei kulturellem Wandel nun einmal üblich ist.

Zum Beispiel liegt es intuitiv nahe, sich selbst und andere als physische Körper zu betrachten, die von unsichtbaren Seelen bewohnt und gesteuert werden. Kinder entwickeln diese »Theory of Mind« spontan, und die meisten Kulturen und Religionen vertreten modifizierte Versionen davon. Die Wissenschaft vertreibt nun diesen Leib-Seele-Dualismus allmählich und entlarvt ihn als Illusion – doch wir werden gewiss fortfahren, mentale Phänomene als unterschiedlich von Körpervorgängen wie der Verdauung zu betrachten.

Eine solche angemessene, erfolgreiche Komplexitätsreduktion dürfen wir als Indiz für einen Fall von »wirklicher« Emergenz betrachten. Wenn die Beschreibung eines abstrakten komplexen Systems mittels Komplexitätsreduktion zu emergenten konkreten Eigenschaften führt, die wir zwar schon vorher kannten, aber bisher als unerklärliche Lebenstatsachen betrachteten, dann haben wir echte Emergenz entdeckt.

Was Komplexität nicht vermag

Da Komplexität und Emergenz sehr unscharfe Begriffe sind, wirken sie verführerisch: Sie scheinen das Versprechen einer einheitlichen Theorie für Strukturen und deren Entwicklung zu enthalten. Doch an sich haben diese Begriffe keine Erklärungskraft; sie bezeichnen nur Fälle von »qualitativem«

Wandel, wie den Phasenübergang von Flüssigkeit zu Gas am Siedepunkt.

Tatsächlich haben mit Komplexität zusammenhängende Ideen nicht die in sie gesetzte Hoffnung erfüllt, sie könnten als Grundlage einer allgemeinen Theorie der Natur dienen. In den 1980er Jahren trugen viele wissenschaftliche Aufsätze »Chaos« und »Fraktal« im Titel, und der belgische Chemienobelpreisträger Ilya Prigogine (1917–2003) propagierte einen Wandel der wissenschaftlichen Methodik »vom Sein zum Werden«. Er hatte chemische Prozesse fern vom thermischen Gleichgewicht analysiert und unterschiedliche Beispiele für das spontane Entstehen geordneter Strukturen beschrieben. In seinen späteren Jahren versuchte er eine allgemeine Theorie der Selbstorganisation zu schaffen, die Ameisenkolonien und menschliche Siedlungen einschließen sollte.

Der französisch-amerikanische Mathematiker Benoît Mandelbrot (1924–2010), der als Forscher für die Computerfirma IBM arbeitete, veröffentlichte 1982 ein bahnbrechendes Buch über die »fraktale Geometrie der Natur«. In den 1980er Jahren wurden Personalcomputer zum Allgemeingut, und nun konnte man damit faszinierende Bilder von Reisen durch die unendlichen »selbstähnlichen« Details der berühmten Mandelbrotmenge erzeugen. Fraktale Mengen schienen die passende Mathematik für die Beschreibung »rauer« oder »chaotischer« Phänomene zu liefern, von der Geometrie von Küstenlinien und Blumenkohl bis zum Verhalten von Aktienmärkten.

Die technische Grundlage dieser Entwicklungen bildete die allgemeine Zugänglichkeit von Computern. Diese können das Verhalten »chaotischer« nichtlinearer Systeme simulieren und die Werte so genannter iterierter Funktionen mit hoher Geschwindigkeit numerisch berechnen. Heutzutage liefern Supercomputer auf dieser Grundlage verlässliche Wettervorhersagen und umfassende Klimamodelle, simulieren »chaotische« Verbrennungsvorgänge oder berechnen komplexe Wechselwirkungen fundamentaler Teilchen.

Das sind große Errungenschaften, aber sie ebneten nicht den Weg zu einer einheitlichen Theorie komplexer Phänomene. Prigogine versuchte am Ende sogar, eine fundamentale Theorie der Quantenmechanik zu entwickeln, die auf mathematischen Begriffen aus der statistischen Thermodynamik beruhte und den Zeitpfeil einschloss – aber ohne Erfolg. Aus diesem Fehlschlag lässt sich vielleicht eine allgemeine Lehre ziehen. Die Weiterentwicklung komplexer Systeme vermag durch Emergenz ganze Hierarchien von Phänomenen zu erzeugen, die wissenschaftlichen Fachbereichen entsprechen und aufeinander ruhen wie die Stockwerke eines Turms. Diese Evolution führt, wie von John Maynard Smith und Eörs Szathmáry 1995 in »The Major Transitions in Evolution« beschrieben, »aufwärts« von ganz abstrakten zu immer konkreteren Modellen: von der Elementarteilchenphysik zu statistischen Ensembles und zur Chemie, von dort zu Biochemie und Biologie und weiter zum Studium von Ökologie und Gesellschaften.

RAMA / CC-BY-SA-2.0-FR (HTTP://CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY-SA/2.0/FR/DEED.DE)

Benoît Mandelbrot untersuchte mathematische Gebilde mit fraktaler – nicht ganzzahliger – Dimension und wies auf ihre Ähnlichkeit mit komplexen Naturformen hin. Berühmt wurde das »Apfelmännchen«, die unendlich detailreiche Darstellung der nach Mandelbrot benannten Menge.

Die Richtung der Emergenz

Doch die Emergenz ist eine Einbahnstraße; der Erklärungsaufzug in diesem hierarchischen Gebäude fährt nur aufwärts, nie abwärts. Es ist möglich, die nächsthöhere Ebene durch Herleiten ihrer komplexen Phänomene aus der größeren Komplexität der niedrigeren Ebene zu erklären, aber niemals umgekehrt. Die fundamentale Physik der Quantenmechanik lässt sich nicht mit den Mitteln der nächsten Ebene, der Thermodynamik, beschreiben. Der Zeitpfeil (»Werden«) gehört zur Ebene der statistischen Theorie; er kann nicht abwärts ins Erdgeschoss der reversiblen Teilchenphysik (»Sein«) projiziert werden.

Einen solchen Fehler scheinen mir jene Physiker zu begehen, die versucht haben, mit dem Begriff »Information«die Quantenphysik zu erklären. Sie behaupten, die physikalische Realität bestehe auf der fundamentalsten Quantenebene weder aus Materie noch Energie, sondern aus Information. Doch wie die Entropie gehört jeder quantifizierbare Begriff von Information nicht zur zeitsymmetrischen Quantenmechanik, sondern entstammt der nächsthöheren Ebene, der statistischen Thermodynamik.

Noch viel weniger lassen sich hochgradig emergente Phänomene wie Intentionen, Entscheidungen oder »freier Wille« irgendwie direkt aus dem Unbestimmtheitsprinzip der Quantenmechanik herleiten, obwohl diese immer wiederkehrende Idee anscheinend große Anziehungskraft ausübt. Quantenmechanische Unbestimmtheit erklärt nicht Entscheidungsfreiheit.

W I S wissenschaft in die schulen!

Didaktische Materialien für den Unterricht zum Thema »Wärmelehre« kostenfrei herunterladen unter:

www.wissenschaft-schulen.de/waerme

PUBLIC DOMAIN

Für sich allein ist Robinson Crusoe kaum ein Mensch; er ist ähnlich isoliert wie ein einzelnes Gasatom, dem man weder Druck noch Temperatur zusprechen kann. Doch kaum taucht Freitag auf, bilden die zwei schon eine ganze Gesellschaft, die auf dieser Illustration aus den 1870er Jahren deutlich die idealisierten Züge des zeitgenösssischen Kolonialismus trägt.

Dieses Beispiel zeigt: Selbst wenn die Emergenz scheinbar in der richtigen Richtung wirkt, das heißt »aufwärts«, kann sie fehlgehen, wenn dabei eine so genannte Sphärenvermengung stattfindet. Ein bekanntes Exempel ist der Sozialdarwinismus. Er überträgt biologische Begriffe wie »Kampf ums Dasein« und »Überleben des Tüchtigsten« unkritisch auf die Soziologie. Dabei werden metaphorische Ausdrücke, die Charles Darwin für seine Erklärung der biologischen Evolution prägte – in der Tat angeregt durch zeitgenössische Ideen des britischen Ökonomen Robert Malthus (1766–1834) –, missverstanden als vermeintlich naturwissenschaftlich herleitbare Ziele und Werte für menschliche Kulturen. Doch der biologischen Evolution liegt das Prinzip der genetischen Vererbung zu Grunde, während die Geschichte menschlicher Gemeinschaften auf der Weitergabe von kulturellem Erbe beruht.

Andererseits folgt daraus keineswegs, dass die beiden Bereiche absolut nichts gemein hätten; schließlich hat sich die soziale Domäne allmählich in wissenschaftlich rekonstruierbaren Schritten aus dem biologischen Naturreich entwickelt. Darum gibt es ein faszinierendes Gegenbeispiel zum sozialdarwinistischen Missbrauch der Biologie in der Soziologie: die Erforschung der Emergenz von Kooperation und »Altruismus« unter Tieren sowie unter auf den eigenen Vorteil bedachten Agenten in sozialen Spielen. Offensichtlich sind isolierte Individuen an sich durch ihre biologische Fitness definiert; zusätzlich beginnen sie in ihren Interaktionen mit ihresgleichen Anzeichen von altruistischem Verhalten zu zeigen, das sich dann im Nachhinein als »kulturell« interpretieren lässt.

Damit entwickeln die Individuen einer Population Emergenz wie die Atome eines Gases. Jedes einzelne verhält sich nach zeitlosen Gesetzen, doch insgesamt haben sie eine Geschichte in der Zeit. Solange Robinson Crusoe auf seiner Insel allein blieb, kreisten Tag und Nacht, Regen und Sonnenschein, Flut und Ebbe in ewiger Wiederkehr. Erst als ein anderes menschliches Wesen erschien, dem Robinson passenderweise den Namen des Wochentags gab, an dem der Mitmensch auftauchte, begann für ihn die Zeit erneut zu fließen. ~

DER AUTOR

Michael Springer ist promovierter Physiker, Schriftsteller und ständiger Mitarbeiter von »Spektrum der Wissenschaft«.

QUELLEN

Carnap, R.: Der logische Aufbau der Welt. Felix Meiner, Hamburg 1999

Crutchfield, J. P.: Between Order and Chaos. In: Nature Physics 8, S. 17–24, 2012

Mandelbrot, B. B.: Die fraktale Geometrie der Natur. Birkhäuser, Basel 1987

Maynard Smith, J., Szathmáry, E.: Evolution. Prozesse, Mechanismen, Modelle. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1996

Prigogine, I.: Vom Sein zum Werden. Zeit und Komplexität in den Naturwissenschaften. Piper, München 1979

Zeh, H. D.: The Physical Basis of the Direction of Time. Springer, Berlin 2001

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1157699**

Science-Shop.de

2013 KALENDER WELTEN

SCIENCE-SHOP SPEZIAL 5/2012

Die schönsten Kalender – für Sie ausgewählt!

HINTERGRUNDBILD: FOTOLIA / LUMENESCA

1 STERNZEIT

Kalendarium dtsch.-engl., 13 farb. Blätter, Maxi-Format: 70 x 50 cm, Palazzi Verlag

Bestell-Nr. 1335 € 44,80

Modernste Teleskope geben uns verblüffende Ausblicke und tiefe Einblicke in die Struktur und Entwicklung des Universums. Mit informativen Texten und Detail-Abbildungen.

2 M. C. ESCHER

Internationales Kalendarium,12 Monatsblätter, Foliendeckblatt, Format: 50 x 66 cm, Ackermann

Bestell-Nr. 2173 € 34,95

Eschers technische Konstruktionen wirken perfekt – sind aber nicht Realität. Gerade im Großformat der Abbildungen dieses Kalenders entfaltet Eschers faszinierende konstruierte Welt ihre eindrückliche, suggestive Wirkung!

3 STARKE TYPEN – WELT DER TIERE

Text dtsch.-engl.-französ., 13 farb. Blätter, Format: 60 x 50 cm, Palazzi-Verlag

Bestell-Nr. 3362 € 39,80

Wieviel Kraft und Lebensfreude – wieviel Charme und Witz diese Bilder vermitteln! 12 Glanzlichter der Tier-Fotografie als idealer Begleiter durch das Jahr.

4 WEGE

Kalendarium dreisprachig, mit Jahresübersicht, 13 farb. Blätter, Format: 48 x 54 cm, Ackermann

Bestell-Nr. 2433 € 29,95

Sie wissen doch: Der Weg ist das Ziel! Wege durch interessante Landschaften in den jeweiligen Jahreszeiten – wunderschön fotografiert.

5 VERBORGENE WELTEN

Kalendarium mehrsprachig, 13 farb. Blätter, Format: 49,5 x 68,5 cm, DuMont

Bestell-Nr. 2176 € 34,99

Entdecken Sie die Welt der Pflanzen, Insekten und Bakterien aus nächster Nähe. Die mehrfach ausgezeichneten Wissenschaftsfotografen Oliver Meckes und Nicole Ottawa führen Sie in die Welt des Raster-Elektronenmikroskops. Wissenschaftliche Fotografien, abgerundet durch sachkundige und informative Texte.

6 HIMMEL UND ERDE

13 farb. Blätter, Format: 55,5 x 45,5 cm, Spiralbindung, Weingarten

Bestell-Nr. 1338 € 32,–

In diesem Kalender von STERNE UND WELTRAUM präsentieren Astronomen zwölf faszinierende Aufnahmen von Sternen, Planeten und dem Weltraum. Das Kalendarium bietet zusätzlich Hinweise auf wichtige Himmelsereignisse im Jahr 2012.

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich

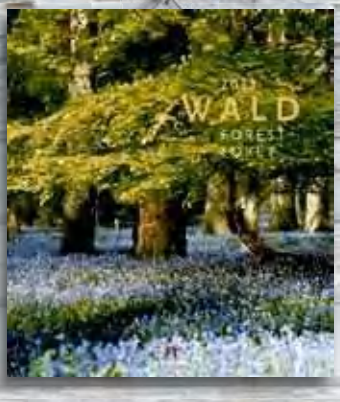
Bestellen Sie direkt: +49 6221 9126-841 · info@science-shop.de

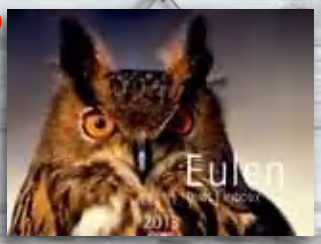
Bequem bestellen:

- → direkt bei www.science-shop.de
- → per E-Mail info@science-shop.de
- → telefonisch +49 6221 9126-841
- → per Fax +49 711 7252-366
- → per Post Postfach 810680 • 70523 Stuttgart

Für Bestellungen außerhalb Deutschlands und Österreichs berechnen wir € 3,50 Versandkosten. Alle Preise inkl. Umsatzsteuer. Preise unter Vorbehalt. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH

HINTERGRUNDBILD: FOTOLIA / LUMENESCA





1 NATURTAFELN

Mit Zweimonats-Kalendarium, 7 farb. Blätter, Format: 49,5 x 68,5 cm, DuMont

Bestell-Nr. 2878 **€ 26,99**

Sechs Schreiber-Tafeln zu interessanten Wissensgebieten aus Flora und Fauna mit vielen detailgetreuen Abbildungen befinden sich in diesem Kalender. Bleiben Sie ein Jahr lang der Natur auf der Spur!

2 DAS MEER – PLANET OCEAN

Kalendarium dtsch.-engl.-französ., 13 farb. Blätter, Format: 60 x 50 cm, Palazzi

Bestell-Nr. 2429 **€ 39,80**

Zwölf außergewöhnliche Studien über Wind und Wellen, vom Spiel der Elemente und den riesigen Weiten der Ozeane.

3 ZAUBER DER STERNE

Kalendarium zweisprachig, 13 farb. Blätter, Format: 52 x 42,5 cm, DuMont

Bestell-Nr. 3671 **€ 22,99**

Das weltumspannende Projekt »The World at Night« (TWAN) zeigt den Himmel über magischen Orten der Erde. Zwölf der eindrucksvollsten Fotografien zwischen Himmel und Erde finden Sie in diesem Kalender.

4 WALD

14 farb. Blätter, Format: 48 x 54 cm, Ackermann

Bestell-Nr. 3674 **€ 29,95**

Ob mystischer Urwald oder herbstliche Baumkronen in voller Farbenpracht – in den Bildern dieses Kalenders offenbart sich die Vielfalt des Ökosystems Wald in seiner ganzen Pracht.

5 ANIMALS IN FOCUS – POSTER-KALENDER

13 farb. Blätter, 12 Passepartoutblätter, Format: 33 x 66 cm, Ackermann

Bestell-Nr. 3668 **€ 34,95**

Die mattschwarzen Rahmen setzen die hochglänzenden Tierfotografien gekonnt in Szene und sorgen für spannende Einblicke durch besondere Ausschnitte. Klappen Sie die Passepartouts ganz nach hinten weg, wird der Kalender zur hochwertigen Postersammlung für viele Jahre.

6 EULEN

Kalendarium dtsch.-engl.-französ., 13 farb. Blätter, Format: 45 x 34,5 cm, Weingarten

Bestell-Nr. 2185 **€ 19,95**

Diese scheuen Nachtvögel gehören von Anbeginn zum Kreis der Geschöpfe, die den Menschen von besonderer Bedeutung waren, ob als Symbol für Weisheit (bei den alten Griechen) oder Tod und Verderben (bei den Christen).

7 EARTH TO EARTH

Kalendarium dtsch.-engl.-französ., 13 farb. Blätter, Format: 54 x 48 cm, Ackermann

Bestell-Nr. 3672 **€ 29,95**

Der neuseeländische Land-Art-Künstler Martin Hill arbeitet ausschließlich mit Naturmaterialien, die er an Ort und Stelle findet. Seine harmonischen und erstaunlich präzisen Installationen unterliegen der Vergänglichkeit.

Bestellen Sie direkt: **+49 6221 9126-841** **@ info@science-shop.de**

8 ZWEITAUSENDDREIZEHN

13 farb. Blätter m. formgestanzten Zahlen, Format: 33 x 45 cm, Ackermann

Bestell-Nr. 3666 **€ 24,95**

Einen ungewöhnlichen Anspruch an Ablauf und Sehgewohnheiten stellt der Kalender an seinen Nutzer und Betrachter. Gegen den üblichen Rhythmus von hinten nach vorne geblättert, überlagern sich die formgestanzten Zahlen dieses Kalenders Monat für Monat zu immer komplexer werdenden grafischen Mustern.

Bequem bestellen:
→ direkt bei www.science-shop.de
→ per E-Mail info@science-shop.de
→ telefonisch +49 6221 9126-841
→ per Fax +49 711 7252-366
→ per Post Postfach 810680 • 70523 Stuttgart

Für Bestellungen außerhalb Deutschlands und Österreichs berechnen wir € 3,50 Versandkosten. Alle Preise inkl. Umsatzsteuer. Preise unter Vorbehalt. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH

9 TERRA

Intern. Kalendarium, 13 farb. Blätter, Format: 33 x 100 cm, Ackermann

Bestell-Nr. 3675 € 39,95

Das Premium-Panorama-Format des Kalenders unterstreicht die Kraft der farbstarken Luftaufnahmen und zeigt die Schönheit der verschiedenen Kontinente unserer Erde.

10 STERNENHIMMEL

13 farb. Blätter, Format: 45 x 33 cm, Weitsicht

Bestell-Nr. 3683 € 19,95

Seit vielen Jahren bereist der Astrofotograf Bernd Pröschold die entlegensten Landschaften der Erde. Unter dunklem Himmel hält er das Geschehen am Firmament in bis zu 24-stündigen Zeitrafferaufnahmen fest.

11 NATURE PHOTO ART

Text dtsch.-engl., 13 Duplex-Blätter, Format: 50 x 70 cm, Palazzi

Bestell-Nr. 3669 € 44,80

Zwölf Natur-Studien von Michel Rajkovic in höchster Druck-Qualität – nah am Original-Fotoabzug. Die bewußte Beschränkung auf Schwarz und Weiß mit einer Palette feinster Grau-Töne verleihen diesen Bildern besondere Präsenz.

12 KREATUREN DER TIEFSEE

Internat. Kalendarium, 13 farb. Blätter, Format: 45 x 34,5 cm, Weingarten

Bestell-Nr. 3673 € 19,95

In einer Tiefe von 1000 Metern gibt es keinerlei Lichteinfall. So produzieren die Wesen, die hier leben, ihre eigenen Lichtquellen, um Futter anzulocken oder Feinde abzuschrecken.

13 VOM ZAUBER ALTER BÄUME

Kalendarium dreisprachig, 13 kolorierte SW-Blätter, Format: 58,4 x 48,5 cm, DuMont

Bestell-Nr. 3361 € 26,99

Zwölf verwitterte und steinalte Baumriesen präsentieren sich in ihrer ganzen Ehrwürdigkeit und Imposanz. Heinz Wohner hat sie in Deutschland aufgespürt und fotografiert. Anschließend hat er seine Schwarzweiß-Fotografien kunstvoll von Hand koloriert.

14 LEUCHTTÜRME

Kalendarium dtsch.-engl.- französ., 13 farb. Blätter, Format: 33 x 67,5 cm, Weingarten

Bestell-Nr. 2876 € 19,95

Majestätisch und geheimnisvoll wachen Leuchttürme über Wasser und Land. Der Kalender präsentiert Bauwerke aus Deutschland, Frankreich, Australien, Dänemark, den USA und Namibia.

15 TECHNICS XXL

Kalendarium viersprachig, 13 farb. Blätter, Format: 48 x 64 cm, teNeues

Bestell-Nr. 3667 € 14,99

Ein Liebhaberstück für alle Technik-Freaks! Ob Braunkohlebagger, Staudamm, Photovoltaikanlage oder Windpark, diese gigantischen Technikwunder lassen Männerherzen höher schlagen.

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich

16 DER LEBENSFREUDE INSPIRATIONEN-KALENDER

13 farb. Blätter, Spiralbindung, Format: 58,5 x 48,5 cm, DuMont

Bestell-Nr. 3670 € 29,99

Wunderschöne Blütenfotos und die positiven Denkanstöße von Dr. Doris Wolf und Dr. Rolf Merkle machen diesen Kalender zu einem wohltuenden Begleiter durch das Jahr.

Mehr Infos und weitere Kalender:
www.science-shop.de/kalender

Bequem bestellen:

→ **direkt bei** www.science-shop.de

→ **per E-Mail** info@science-shop.de

→ **telefonisch** +49 6221 9126-841

→ **per Fax** +49 711 7252-366

→ **per Post** Postfach 810680 • 70523 Stuttgart

Für Bestellungen außerhalb Deutschlands und Österreichs berechnen wir € 3,50 Versandkosten. Alle Preise inkl. Umsatzsteuer. Preise unter Vorbehalt. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH

WAS BLÜHT DENN DA?
Notizkalender

13 farb. Bl., Spiralbindung, 22 x 49 cm., DuMont

Bestell-Nr. 3677 € 9,99

Dieser praktische und dekorative Notizkalender ist doppelt nützlich: Er erleichtert die Terminplanung und hilft bei der Beantwortung der Frage: Was blüht denn da?

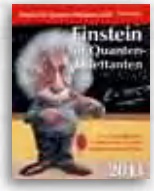
HEIMISCHE VÖGEL
Kalender

Mit Nutzkalendarium, 13 farb. Bl., 30 x 39 cm, Weingarten

Bestell-Nr. 2435 € 14,95

Dieser individuell gestaltete Kalender präsentiert zwölf heimische Vogelarten zusammen mit einem passenden Zitat.

Abreißkalender – Wissen für jeden Tag



EINSTEIN FÜR QUANTEN-DILETTANTEN
Ein vergnüglicher Crashkurs in Sachen Naturwissenschaften

320 zweifarb. Bl., 12,5 x 16 cm, Harenberg

Bestell-Nr. 3093 € 15,99

Täglich spannende Erklärungen aus Biologie, Physik, Chemie usw. Verblüffend und leicht verständlich!

SIMPLIFY YOUR DAY
Einfacher und glücklicher leben

320 Bl. m. Cartoons, 12,5 x 16 cm, Campus

Bestell-Nr. 2174 € 12,99

Schluß mit der Kompliziertheit des Lebens. Die Fülle praktischer und sofort umsetzbarer Tipps sowie die liebevollen Zeichnungen von Werner Tiki Küstenmacher sorgen für die tägliche Leichtigkeit des Seins.

DENKST DU NOCH ODER PHILOSOPHIERST DU SCHON?
Ein vergnüglicher Exkurs in die wunderbare Welt der Philosophie

320 farb. Bl., 12,5 x 16 cm, Harenberg

Bestell-Nr. 3676 € 15,99

Humorvolle und alltagsnahe Antworten auf die großen und kleinen Fragen der Philosophie.

KALENDER FÜR CLEVERE KIDS
Der Kinder Brockhaus

320 zweifarb. Bl., 12,5 x 16 cm, Brockhaus

Bestell-Nr. 1309 € 10,99

Der tägliche Kick für schlaue Kinder: Spannende Fakten, atemberaubende Rekorde und witzige Anekdoten, Rezepte und Experimente, knifflige Rätsel, exotische Tiere vom WWF vorgestellt. Ab 8 Jahren.

MEYERS! GRIPS-GYMNASTIK
320 zweifarb. Bl., 11 x 14 cm, Meyers

Bestell-Nr. 1535 € 9,99

Das tägliche 5-Minuten-Training für Gedächtnis, Konzentration, Kreativität und schnelles Denken.

WISSEN FÜR KIDS
320 vierfarb. Bl., 12,5 x 16 cm, Harenberg

Bestell-Nr. 2870 € 12,99

Eine spannende Entdeckungsreise durch die Welt des Wissens. Farbenfrohes, kindgerechtes Layout. Ab 10 Jahren.

Jahrbücher

AHNERTS ASTRONOMISCHES JAHRBUCH 2013
ca. 194 S. mit zahlr., meist farb. Abb., DinA4, Spektrum der Wissenschaft

Bestell-Nr. 1339 € 10,90

Ahnerts Astronomisches Jahrbuch ist das unentbehrliche Standardwerk für Hobbyastronomen. Im handlichen Zeitschriftenformat enthält es alle wichtigen Informationen über die Himmelsereignisse 2013.

KOSMOS HIMMELSJAHR 2013
Sonne, Mond und Sterne im Jahreslauf

Hrsg. v. Hans-Ulrich Keller, 288 S. m. zahlr. Farbabb., kart., Franckh-Kosmos

Bestell-Nr. 1316

€ 16,99 (D), € 17,50 (A)

Aktuelle Himmelsschauspiele, zuverlässige kalendarische Angaben und die beliebten Monatsthemen: das *Kosmos Himmelsjahr* ist ein Multitalent, das von seinen Lesern sehr geschätzt wird.

Ebenfalls lieferbar als

KOSMOS HIMMELSJAHR PROFESSIONAL 2013
Buch m. DVD-ROM für Windows, Franckh-Kosmos

Bestell-Nr. 1317 € 26,99

Das Package für Profis: *Kosmos Himmelsjahr* als Buch und die DVD *Kosmos Himmelsjahr digital* in attraktiver Geschenkbox.

LATEIN
Sprachen lernen leicht gemacht

320 Bl. m. zahlr. zweifarb. Cartoons, 12,5 x 16 cm, Harenberg

Bestell-Nr. 2871 € 9,99

Das spannende Übungsprogramm vermittelt die Faszination einer vergangenen Sprache und Kultur eindrucksvoll und lebendig. Mit Vokabelsammlung im Anhang.

BESTELLCOUPON

Gleich bestellen! Einfach Bestellcoupon kopieren und faxen an: 0711/7252-366 oder ausschneiden und per Post schicken: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH • Science-Shop • Postfach 810680 D-70523 Stuttgart. Schicken Sie eine E-Mail an: info@science-shop.de oder rufen Sie an unter: 06221/9126-841.

JA, ich bestelle und habe 14 Tage volles Rückgaberecht

Anzahl	Bestell-Nr.	Titel	€

Besteller-Anschrift:

Name/Vorname

Straße/Hausnummer

Datum/Unterschrift

E-Mail-Adresse

☐ **Zahlung per Bankeinzug**

Geldinstitut/Ort

Konto-Nr.

BLZ

Datum/Unterschrift

☐ **Zahlung per Rechnung**

PLZ/Wohnort

Kunden-Nr. (falls vorhanden)

KAL12SDW

Für Bestellungen außerhalb Deutschlands und Österreichs berechnen wir € 3,50 Versandkosten. Alle Preise inkl. Umsatzsteuer. Preise unter Vorbehalt. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH

Skalpell on the rocks

»Die Kälte spielt in der modernen Anaesthesie eine große Rolle, sie wurde 1938 von Allen wiederentdeckt. Bei der Eisanaesthesie darf das betreffende Glied nicht zum Gefrieren gebracht werden, es wird lediglich in einer eisgefüllten Zinkwanne auf eine Temperatur von +4 °C unterkühlt. Bei dieser Temperatur tritt eine Lähmung der schmerzleitenden Nervenfasern im Gewebe ein. Nach der Durchführung der Unterkühlung ist eine Amputation schmerzfrei durchführbar, das Allgemeinbefinden wird nach der Wiedererwärmung praktisch nicht beeinträchtigt.« Die Umschau in Wissenschaft und Technik 17, 1962, S. 545

Nase vorn beim Elektronenbeschleunigen

»Gegenüber dem Bau von Beschleunigern von Protonen war der Bau von Geräten, die Elektronen auf sehr hohe Energie beschleunigen, etwas in Rückstand geraten. Die erste dieser Maschinen, die betriebsfertig wurde, ist das Elektronen-Synchrotron in Cambridge. Dieses Gerät ist ein Ringbeschleuniger von 72 m Durchmesser, in dem Elektronen auf eine Endenergie von 6 GeV (6 Milliarden Elektronenvolt) gebracht werden können. Ein Elektronenbeschleuniger ähnlicher Leistung wird von der Forschungsgruppe DESY in Hamburg gebaut, ist jedoch noch nicht fertiggestellt.« Kosmos 9, 1962, S. 358

Der erste Fernsehsatellit

»›Telstar‹ ist aus 15 000 Einzelteilen, darunter eine Elektronenröhre und 2528 Halbleitern, zusammengesetzt. Die elektronische Ausrüstung ist in einer Kunststoffmasse fixiert, die sich ihrerseits in einem Aluminiumgehäuse befindet. Beim siebenten Erdumflug vermittelte ›Telstar‹ gleichzeitig telephonische Anrufe, rasche Nachrichtensendungen und Bildfunkübertragungen. Im Zusammenhang mit dem Uebermittlungsversuch wurde ein Fernschreiber verwendet, der 1500 Worte pro Minute schreibt.« Neuheiten und Erfindungen 322, 1962, S. 149 – 150

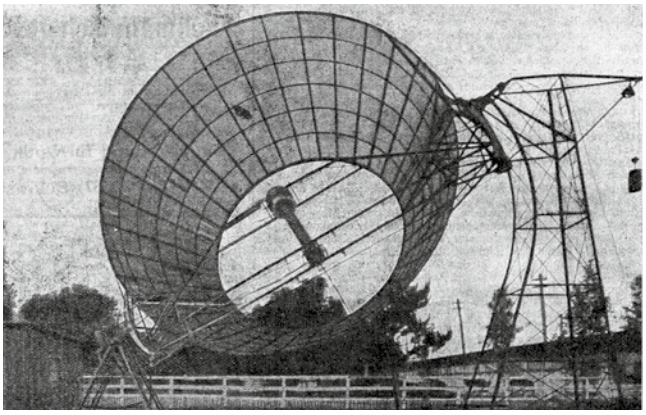
Der erste Fernsehsatellit »Telstar« vermittelte 60 Telefonverbindungen, Fernsehen und Bildfunk gleichzeitig.

Das Licht in der Meerestiefe

»Untersuchungen erstreckten sich auf den Widerstand, den Meerwasser den Lichtstrahlen entgegensetzt. Die verschiedenen Ausstrahlungen, aus denen das Sonnenlicht sich zusammensetzt, wurden sehr ungleichmäßig aufgesogen. Bis zu einer Tiefe von 100 Meter sind noch alle Lichtelemente festzustellen. In 500 Meter Tiefe dagegen ist das Rot bereits aufgesogen, während die blauen und violetten Strahlen mit Hilfe der photographischen Platte noch wahrgenommen werden können. In 1000 Meter Tiefe aber sind nur die violetten und ultravioletten Strahlen noch feststellbar. Von 1700 Meter Tiefe ab wird der Ozean nur noch durch die Ausstrahlungen leuchtender Seetiere erhellt.« Central-Zeitung für Optik und Mechanik 26, 1912, S. 292

Der Sonnendampfkessel

»Seit einigen Jahren beginnt man mit dem Bau der sogenannten ›Sonnenmotoren‹, d. h. von Kraftmaschinen, die ihren Antrieb durch die Sonne selbst erhalten. Man baute – es geschah dies in Südkalifornien – einen riesigen Brennspiegel von zehn Meter Durchmesser. Die Achse war direkt auf die Sonne gerichtet. Die Wirkung dieses Brennspiegels war nun dieselbe, wie die eines jeden anderen Brennspiegels auch. Er vereinigte die auf ihn fallenden Sonnenstrahlen in einem Punkte. In diesem Brennpunkt befindet sich ein Dampfkessel, der also, anstatt wie gewöhnliche Dampfkessel mit Kohle oder Koks, direkt mit Sonnenstrahlen geheizt wird. So entsteht Dampf, der dann in der Dampfmaschine seine Ausnützung findet.« Central-Zeitung für Optik und Mechanik 26, 1912, S. 315 – 316



1700 Spiegel fokussieren Sonnenlicht auf einen Dampfkessel.

AUS ZEITSCHRIFTEN DER FORSCHUNGSBIBLIOTHEK FÜR WISSENSCHAFT- UND TECHNIKGESCHICHTE DES DEUTSCHEN MUSEUMS

METEOROLOGIE

Wie Tief Xynthia Luft holte

Warum strömt die Luft in einer linksdrehenden Spirale in ein Tiefdruckgebiet hinein? Weil sie durch die Corioliskraft nach rechts abgelenkt wird.

VON THOMAS RUBITZKO

»Das Orkantief Xynthia liegt mit seinem Kern über dem Ärmelkanal und verlagert sich rasch nordostwärts. Infolgedessen ist in fast ganz Deutschland mit Orkanböen von Südost auf Südwest bis West drehend zu rechnen«, verkündet der Nachrichtensprecher. Das dazugehörige Fernsehbild (rechts) oder – noch eindrucksvoller – der Zeitrafferfilm aus Satellitenaufnahmen zeigt uns, dass die Luft in einer linksdrehenden Spirale auf einen Punkt zustürzt, als säße dort der Abfluss einer Badewanne. Jedes Luftteilchen vollführt eine lange, immer enger werdende Linkskurve, wie man an den mitgerissenen Wolkenfetzen erkennt. Würde das »Loch«, das in Wirklichkeit ein Punkt minimalen Luftdrucks ist, nicht seinerseits wandern, hätten wir an jedem Ort einigermaßen konstante Windverhältnisse, solange das Tiefdruckgebiet besteht.

Aber wie kommt überhaupt eine Spirale zu Stande? Warum sieht es so aus, als würde die Luft in ihr beständig und zunehmend stärker nach links abgelenkt? Paradoxe Antwort: Weil sie nach rechts abgelenkt wird, und zwar durch die Erdrotation. Für einen auf der Erde stehenden Beobachter erscheint die Neigung jedes Luftteilchens, seiner Trägheit zu folgen, wie die Wirkung einer Kraft, die es senkrecht zu seiner Flugrichtung ablenkt, und zwar – auf der Nordhalbkugel – nach rechts. Nach dem französischen Physiker Gaspard Gustave de Coriolis (1792–1843) nennt man sie die Corioliskraft.

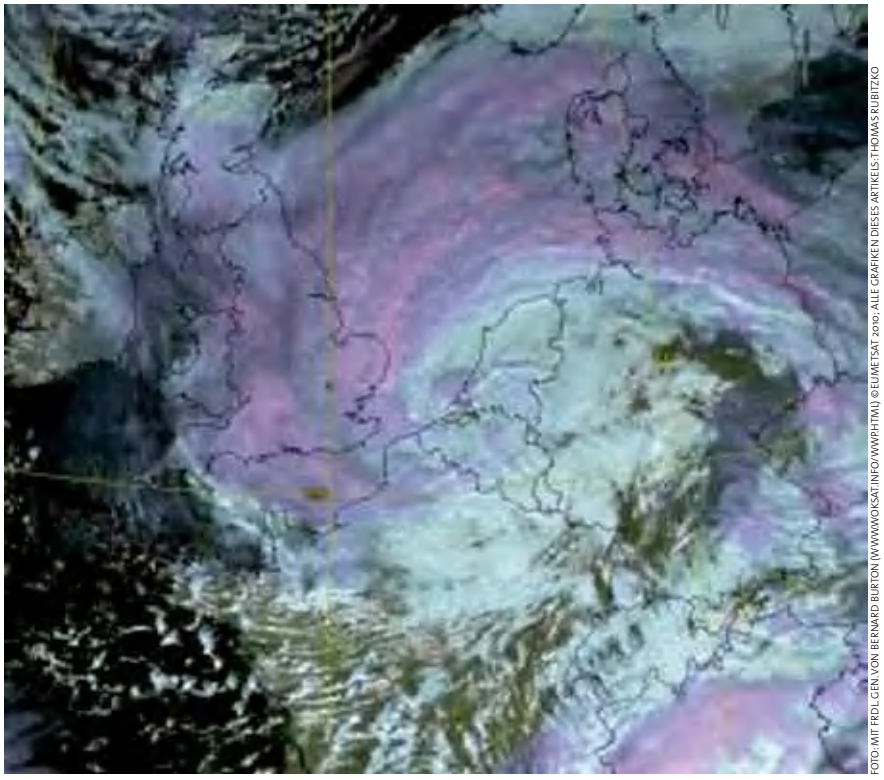
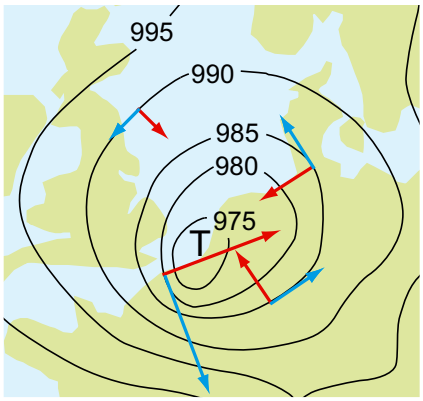


FOTO: MIT FRDL. GEN. VON BERNARD BURTON (WWW.WOKSAT.INFO/WWPHTM) ©EUMETSAT 2010; ALLE GRAFIKEN DIESES ARTIKELS: THOMAS RUBITZKO

Das Orkantief Xynthia am 28. Februar 2010 um 12 Uhr mit seinem Kern über der Küste der Niederlande im Satellitenbild.



Die Karte zeigt zur oben abgebildeten Wetterlage den Luftdruck am Boden mit Isobaren in Millibar. Die Gradientkraft (rot) ist stets senkrecht zur Isobaren und zum niedrigeren Druck hin gerichtet. Ihr würde die Windströmung folgen; aber die Corioliskraft lenkt sie nach rechts ab, bis sie parallel zur Isobaren verläuft (blau).

Aber der Reihe nach. Ursache aller Luftbewegungen sind Unterschiede im Luftdruck. Meteorologen tragen den von Ort zu Ort variierenden Luftdruck (in einer bestimmten Höhe über dem Erdboden) in eine Karte ein und verbinden Punkte gleichen Drucks durch Linien, die Isobaren (Bild links). Diese geben ein ähnliches Bild ab wie die Höhenlinien auf topografischen Karten und sind auch vergleichbar zu interpretieren.

Je näher die Höhenlinien auf einer gewöhnlichen Landkarte beieinander liegen, desto steiler geht es an dieser Stelle bergauf oder bergab. Ein armer Wanderer, der den Halt verliert, wird rechtwinklig zu der Höhenlinie, auf der

er sich befindet, abwärts beschleunigt, und zwar umso stärker, je dichter dort die Höhenlinien liegen. Entsprechend erfährt jedes Luftteilchen eine Kraft, die senkrecht zu seiner Isobare in Richtung auf den niedrigeren Luftdruck gerichtet und umso stärker ist, je dichter dort die Isobaren liegen, je steiler also das Druckgefälle ist (rote Pfeile im Bild S. 60 links unten). Kräfte dieser Art heißen Gradientkräfte.

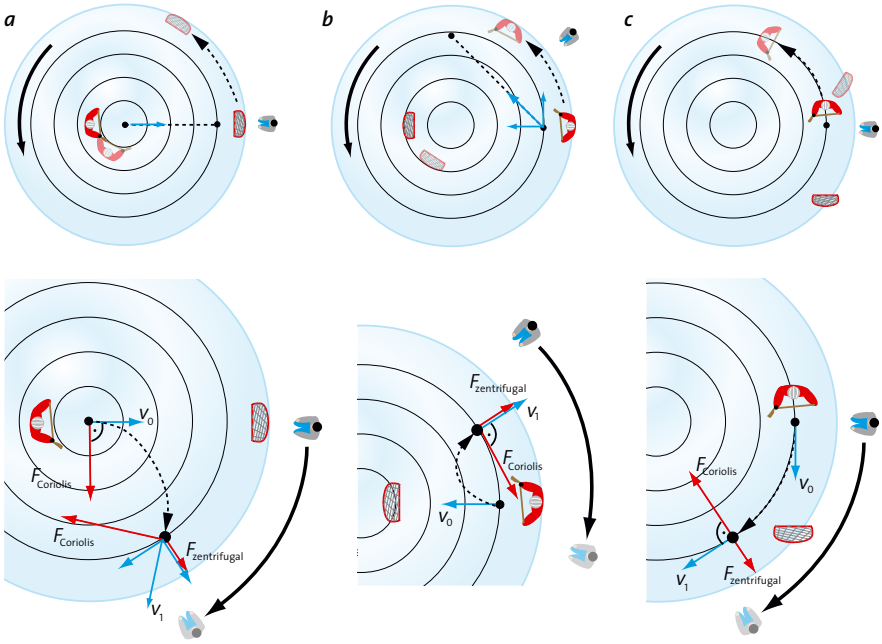
Höhe im Gelände und Druck in der Luft haben noch eine weitere Gemeinsamkeit: Sie sind proportional zu einer potenziellen Energie. In beiden Fällen beschleunigen Gradientkräfte Bewegliches so, dass es sich seiner potenziellen Energie so rasch wie überhaupt möglich entledigt.

Wäre die Druckverteilung zeitlich konstant und die zugehörige Gradientkraft die einzige Kraft, dann würden sich alle Luftteilchen beschleunigt geradewegs zum Kern eines Tiefdruckgebietes bewegen. Dies gilt tatsächlich auch für sehr kleinräumige Druckgebiete, nicht aber, wenn Prozesse großräumig und damit in längeren Zeitintervallen ablaufen.

Spielball der Kräfte

Die Erde dreht sich von Norden aus betrachtet entgegen dem Uhrzeigersinn um ihre Achse. Die Lufthülle ist in Ruhe gegenüber der Erdoberfläche, vollführt jedoch, von außen gesehen, wie die Erde als Ganzes eine Rotationsbewegung, was insbesondere eine zum Zentrum hin beschleunigte Bewegung ist. Diese Beschleunigung wird durch eine Kraft verursacht, und zwar die Gravitationskraft, genauer: deren Komponente senkrecht zur Erdachse. Würde die Gravitation urplötzlich abgeschaltet, so würde die Luft, ihrem gegenwärtigen Impuls folgend, einfach tangential ins All davonschweben.

Bewegte Luft hat zunächst ebenfalls keine natürliche Neigung, der Erdrotation zu folgen. Vielmehr weht sie so, wie ihre Trägheit und – zum Beispiel – Druckkräfte es ihr befehlen, derweil die Erde sich unter ihr wegdreht. Für den erdfesten Beobachter sieht das aber möglicherweise ganz anders aus.



Schuss aufs Tor auf dem rotierenden Eishockeyplatz, aus der Perspektive des außen stehenden (obere Bilder) und des mitrotierenden Beobachters (untere Bilder). Der Spieler zielt vom Zentrum auf das Tor an der Peripherie der Scheibe *(a)*; von der Peripherie aufs Tor im Zentrum *(b)*; in tangentialer Gegenrichtung zur Bewegung der Scheibe *(c)*. Kräfte und Geschwindigkeiten in den unteren Bildern sind im rotierenden Bezugssystem angegeben. Die Anfangsgeschwindigkeit v_0 hat in allen Fällen denselben Wert.

Um das besser zu verstehen, ersetzen wir die Erde in Gedanken durch ein kreisförmiges, im Gegenuhrzeigersinn rotierendes Eishockeyspielfeld (Bild oben). Wenn der Mittelpunkt der Scheibe der Nordpol ist, rotiert sie wie die echte Erde um die Erdachse. Damit die Effekte deutlicher werden, soll die Scheibe allerdings weit schneller rotieren als die Erde. Die Zuschauer dagegen sitzen außerhalb der Scheibe und rotieren überhaupt nicht.

Auf der Scheibe soll nun Eishockey mit einem reibungsfreien Puck gespielt werden. Das Tor steht am Rand und der Spieler im Zentrum der Scheibe (Bild oben, *a*). Der Spieler gibt dem Puck einen Kraftstoß Richtung Tor, und der gleitet in gerader Linie in der richtigen Richtung. Was soll er auch sonst tun? Auf ihn wirken nach dem Abschlag keine Kräfte mehr – jedenfalls nicht in der Scheibenebene. Nur hat sich während der Laufzeit das Tor ein ganzes Stück weitergedreht, so dass der Puck sein Ziel weit verfehlt.

Der Spieler erlebt dies anders. Er wundert sich zwar über die um ihn herumrotierenden Zuschauer, wähnt sich aber in Ruhe auf der Scheibe. Nach dem Schlag beobachtet er eine merkwürdige Rechtsablenkung des Pucks, der dadurch auf einer gekrümmten Bahn läuft und weit vom Tor entfernt die Scheibe verlässt. Um die newtonschen Gesetze weiterverwenden zu können, interpretiert der Spieler die Rechtsablenkung als Folge einer Kraft, die senkrecht zur Bewegungsrichtung nach rechts wirkt. Diese Scheinkraft ist die Corioliskraft (Spektrum der Wissenschaft 12/2008, S. 46).

Physiker fassen ein rotierendes Bezugssystem, wenn überhaupt, dann nur mit spitzen Fingern an. Denn wer sich auf so etwas einlässt, also zum Beispiel den Standpunkt des Eishockeyspielers einnimmt, muss mit Scheinkräften leben. Während der externe Zuschauer die Bewegung des Pucks als geradlinig und gleichförmig beobachtet und nicht weiter darüber nachzudenken braucht – sie steht ja im Einklang mit den newtonschen Gesetzen –, muss der Spieler auf der rotierenden Scheibe die merkwürdigsten Kräf-

te postulieren, nur um die Illusion aufrechtzuerhalten, die newtonschen Gesetze gälten in seiner scheinbaren Ruhe. Das beschränkt sich nicht auf die Corioliskraft; es kommt auch noch die Fliehkraft (»Zentrifugalkraft«) hinzu. Wenn der Spieler den Puck einfach auf den Eisboden legt, ohne ihm Bewegung mitzugeben, gleitet das Ding nach außen weg – so beobachtet es der Spieler. Der Zuschauer von außen dagegen sieht den Puck nur seiner Trägheit folgend geradlinig tangential wegfliegen.

Wenn der Physiker allerdings auf der rotierenden Erde sitzt, bleibt ihm kaum etwas anderes übrig, als sich für ruhend zu halten. Deswegen ist es für ihn sogar überaus sinnvoll, Scheinkräfte zu postulieren. Mit ihrer Hilfe kann er nämlich alle beobachtbaren Bewegungen voraussagen. Er stellt fest, dass die Corioliskraft umso größer ist, je schneller sich der Zuschauer um ihn dreht (der Zuschauer würde sagen, je schneller sich die Scheibe dreht). Außerdem kann er feststellen, dass die Kraft der Geschwindigkeit des bewegten Objekts – in seinem Bezugssystem – proportional ist.

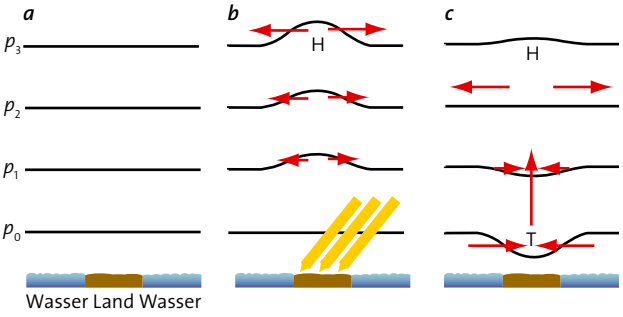
Wenn der Spieler nicht von innen nach außen, sondern vom Rand der Scheibe auf ein Tor in der Mitte zielt, trifft er wieder gewaltig daneben (Bild S. 61, *b*). Außer dem auf das Tor gerichteten Impuls hat der Puck noch einen tangential gerichteten, den er von der Scheibe geerbt hat; er war ja vor dem Abschlag bezüglich der Scheibe in Ruhe. Die Vektoren addieren sich, und der Puck fliegt auf einer geraden Bahn kräftefrei über die Scheibe – aber nicht durch deren Zentrum. Die Scheibe dreht sich unter ihm hindurch.

Der Spieler erlebt den Puck wieder nach rechts abgelenkt auf einer krummen Bahn laufend. Auch hier bleibt ihm nichts anderes übrig, als diesen Bewegungsablauf der rechtsablenkenden Corioliskraft zuzuschreiben. Diesmal macht sich – in seinem Bezugssystem – die Fliehkraft sogar noch auffälliger bemerkbar, während sie beim Stoß vom Zentrum nach außen dem Puck nur einen zusätzlichen Schubs gibt.

Nun schießt der Spieler in tangentialer Richtung entgegen der Drehbewegung. Der Beobachter von außen sieht wieder eine geradlinige, der mitrotierende eine gebogene Bahn. Wenn es dem Schützen gelingt, dem Puck dieselbe Geschwindigkeit zu geben wie die Bahngeschwindigkeit der Scheibe, nur mit umgekehrtem Vorzeichen, dann bleibt von außen gesehen das Geschoss in Ruhe; für den Spieler dagegen vollführt es eine Kreisbahn um den Scheibenmittelpunkt – und schlägt ihm von

Tiefdruckgebiete

Abhängig von ihrer Entstehung unterscheidet man zwei Typen von Tiefdruckgebieten:



Thermisch bedingte Tiefdruckgebiete: Druckunterschiede am Boden können eine Folge unterschiedlicher Temperaturen sein. Wird von mehreren benachbarten Flächen *(a)* die mittlere (Land) stärker erwärmt als die beiden anderen (Wasser) und mit ihr die Luft darüber, so dehnt sich diese nach oben aus. Die Isobarenflächen wölben sich dort nach oben *(b)*. Dabei ändert sich der Druck am Boden zunächst nicht, weil nach wie vor die gleiche Menge Luft auf beiden Flächen lastet.

Das heißt: Über der warmen Fläche nimmt der Luftdruck mit der Höhe nicht so rasch ab wie über der kühlen. Folglich ist in einer bestimmten Höhe der Druck dort größer als nebenan. Dadurch strömt Luft auf diesem Niveau von der erwärmten zu den kalten Seiten, bis das Druckgefälle ausgeglichen ist.

Als Konsequenz lastet nun am Boden über der warmen Fläche eine geringere Luftmasse als über den kühlen *(c)*. Dort nimmt der Druck am Boden ab: Ein Tiefdruckgebiet entsteht.

Dynamische Tiefdruckgebiete sind nicht an einen warmen Kern gebunden, sondern Folge von Unregelmäßigkeiten in der Höhenströmung. Diese Starkwindbänder (»Jetstreams«) umspannen den Globus in mittleren Breiten in einer Höhe von etwa 10 000 Meter.

Angetrieben werden die Jetstreams durch den thermisch verursachten Druckgradienten. Die heiße Umgebung des Äquators und die kalte eines Pols spielen dieselbe Rolle wie zuvor Land und Wasser. In der Höhe herrscht am Äquator ein hoher, am Pol ein niedriger Druck. Zum Ausgleich müsste auf der Nordhalbkugel ein Südwind wehen; aber den lenkt die Corioliskraft nach rechts zu einem isobarenparallelen Westwind ab.

Da die Corioliskraft so den Druckausgleich verhindert, baut sich ein großes Druckgefälle auf, und die Strömungsgeschwindigkeit nimmt zu. Dadurch wird die Höhenströmung instabil und bildet Mäander aus. Dazu trägt auch die unregelmäßige Verteilung von Land und Wasser bei. Durch Trägheitseffekte (Luft strömt mit hoher Geschwindigkeit in ein Gebiet mit geringen Druckunterschieden) überwiegt an gewissen Stellen die Corioliskraft die Gradientkraft so stark, dass die Luft »bergauf« (vom niedrigen zum hohen Druck) strömt. So entsteht ein Tiefdruckgebiet mit niedrigem Druck am Boden wie in der Höhe.

Die so nördlich der Höhenströmung entstandenen Tiefdruckgebiete haben einen kalten Kern und driften verhältnismäßig langsam mit etwa 1000 Kilometern pro Tag nach Osten. Xynthia stellte solch ein dynamisches Tief dar, war aber außerordentlich weit im Süden entstanden und nahm eine ungewöhnliche Zugbahn.

hinten gegen die Füße (Bild S. 61, *c*)! Genaues Nachrechnen ergibt, dass in diesem Fall die Corioliskraft der Fliehkraft genau entgegengesetzt, aber doppelt so stark ist. Die Differenz wirkt wie eine Zentripetalkraft, die den Puck auf seiner Kreisbahn hält.

Zurück zur Realität! Aus dem Eishockeypuck werden wieder Luftteilchen und aus der rotierenden Scheibe die echte Erdkugel. Allerdings wirkt die Corioliskraft immer nur in einer Ebene, die auf der Erdachse senkrecht steht. Ihre rechtsablenkende Wirkung parallel zur Erdoberfläche ist deshalb bei Bewegungen am Pol am größten und nimmt bis zum Äquator auf null ab. Auf der Südhalbkugel verkehrt sich ihre Wirkung in eine Linksablenkung, denn von Süden aus gesehen dreht sich die Erde im Uhrzeigersinn, und alle Bewegungen, auf der Hockeyscheibe wie auf der Erdoberfläche, laufen spiegelbildlich ab.

Der Betrag der Corioliskraft ist allerdings so klein, dass sie erst bei länger anhaltenden, großräumigen Bewegungen zum Tragen kommt.

Schön entlang der Isobaren

Was passiert nun, wenn ein Druckfeld (eine räumliche Druckverteilung) auf der rotierenden Erde auf ein Luftteilchen wirkt? Nehmen wir zunächst an, dass die Isobaren geradlinig und parallel verlaufen. Das Teilchen ist anfangs in Ruhe und wird senkrecht zu den Isobaren beschleunigt. Wieder vernachlässigen wir die Reibung, was in der oberen freien Atmosphäre der Realität recht nahekommt. Die Bewegungsenergie des Teilchens ist gleich der potenziellen Energie, die es aus dem Druckfeld aufgenommen hat, also proportional der Anzahl an Isobaren, die es auf seinem Weg geschnitten hat. Nach der Formel $E_{kin}=mv^2/2$ wächst die Geschwindigkeit mit der Wurzel aus dieser Energie.

Vom ersten Moment der Bewegung lenkt die Corioliskraft das Luftteilchen nach rechts ab, und zwar umso stärker, je schneller es ist. Da es nun nicht mehr den steilsten Weg »bergab« nimmt, nimmt seine Geschwindigkeit nicht so stark zu, wie wenn es die Corioliskraft nicht gäbe; aber sie nimmt zu, bis die Corioliskraft der Gradientkraft entgegengesetzt gleich ist. Genau dann fliegt das Luftteilchen entlang einer Isobaren, den niedrigeren Druck zur Linken und den höheren zur Rechten. Da es auf seinem Weg keine Isobaren mehr kreuzt, wächst der Betrag seiner Geschwindigkeit nicht mehr. Weicht das Teilchen von dem Weg genau auf der Isobaren nach links ab, wird es schneller, daraufhin nimmt die Corioliskraft zu und treibt es auf den »richtigen« Weg zurück. Driftet es dagegen nach rechts ab, muss es im Druckfeld »ansteigen« und wird dadurch langsamer, worauf die Corioliskraft nachlässt, bis beide Kräfte wieder im Gleichgewicht sind.

Dieser Rückkopplungsmechanismus hält das Luftteilchen auch dann noch »in der Spur«, das heißt auf einer Isobaren, wenn diese selbst sich in Fahrtrichtung nach links krümmt, wie dies nahe dem Kern eines Tiefdruckgebiets der Fall ist (Bild S. 60 unten). Um das Luftteilchen in die Linkskurve zu zwingen, muss allerdings die Gradientkraft etwas größer sein als die Corioliskraft.

Bei der Reise um ein Hochdruckgebiet liegt der Hochdruckkern stets rechts der Fahrtrichtung, und die Luft folgt in einer Rechtskurve den Isobaren. Dazu muss die Corioliskraft die Gradientkraft ein bisschen überwiegen. Das kann sie nur durch eine höhere Bahngeschwindigkeit erreichen.

Daraus folgt: Bei gleichem Druckgefälle strömt die Luft schneller aus einem Hochdruckgebiet heraus, als sie in ein Tiefdruckgebiet hineinfließt. Das hat den paradoxen Effekt, dass ein Hochdruckgebiet bereits zerfließt, während es entsteht; dagegen kann ein Tiefdruckgebiet ein stärkeres Druckgefälle aufbauen und damit am Ende doch höhere und sehr unangenehme Strömungsgeschwindigkeiten verursachen.

In den oberen reibungsfreien Luftschichten kann also im Prinzip die Luft im Gegenuhrzeigersinn um das Tief herumwehen, ohne einen Druckausgleich zu erreichen. Am Boden wirken dagegen zusätzlich noch Reibungskräfte, die aus der Wechselwirkung mit der Erdoberfläche resultieren und die Luftströmung bremsen. Dadurch lässt die Corioliskraft nach, und die Gradientkraft gewinnt dann die Oberhand. Also schneidet das Luftteilchen nun auf seinem Weg verschiedene Isobaren, aber die so gewonnene Energie wird alsbald von der Reibung wieder aufgezehrt, und die Geschwindigkeit bleibt annähernd konstant.

Insgesamt fließt die Luft also in Bodennähe nicht um das Tief herum, sondern in einer Spiralbewegung im Gegenuhrzeigersinn in den Kern des Tiefs hinein. Steigt man an einem Ort am Rand des Tiefs nach oben, so dreht sich deshalb der Wind in höheren Lagen wegen der dort geringeren Reibung nach rechts.

Die oben angesprochenen Wechselwirkungen mit der Erdoberfläche sind übrigens das, was von einem Tiefdruckgebiet nachhaltig im Gedächtnis bleibt. Durch das Orkantief Xynthia kamen mehrere Menschen ums Leben; die Versicherungswirtschaft verzeichnete allein in Deutschland Schäden von einer halben Milliarde Euro. Schätzungsweise 500 000 Gebäude und 40 000 Autos wurden beschädigt, ganz zu schweigen von den unzähligen umgestürzten Bäumen. Xynthia zählt damit zu den ganz Großen unter den Orkantiefs, übertroffen nur von dem legendären »Lothar« zu Weihnachten 1999. ~

DER AUTOR

Thomas Rubitzko lehrt Physik und Physikdidaktik an der Pädagogischen Hochschule Ludwigsburg. Er hat von 1995 bis 2006 das Preisrätsel für »Spektrum der Wissenschaft« bearbeitet.

QUELLEN

Egger, J.: Vom Tornado zum Ozonloch. Oldenbourg, München 1999

Weischet, W., Endlicher, W. (Hg.): Einführung in die Allgemeine Klimatologie. Borntraeger, Stuttgart 2008

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1157702

Neues aus dem Reich des Krösus

Schon in der Antike war das kleinasiatische Lydien ein Mythos. Archäologen und Historiker suchen nun nach seinen Spuren nicht nur in der einstigen Hauptstadt Sardis, sondern auch in der lydischen Provinz.

Von Oliver Hülden

Weil er sein Reich in den Untergang geführt hatte, wollte sich Krösus einer Legende nach selbst verbrennen, doch Zeus löschte die Flammen.

FURTWÄNGLER, A. ET AL.: GRIECHISCHE VASENMALEREI – AUSWAHL HERVORRAGENDER VASENBILDER AUS DEM GLEICHNAMIGEN GROSSEN WERKE. MÜNCHEN 1924, TAFEL 113

OLIVER HULDEN

Auf einer Halbinsel im See Gölhisar nahe der namensgebenden türkischen Stadt erforschen deutsche und österreichische Altertumsforscher die Überreste der lydischen Stadt Alt-Kibyra.

Es waren beunruhigende Nachrichten, die König Krösus (griechisch Kroisos), den Herrscher des wohlhabenden Lydien (siehe Karte S. 66), um 550 v. Chr. erreichten. Sein Schwager Astyages, König im benachbarten Medien, war von seiner Armee gestürzt worden. Schlimmer noch: Ein früherer Vasall, der Perser Kyros II., hatte sich dreist des Throns bemächtigt und wollte nun sein Reich vergrößern. Ein Krieg zeichnete sich ab, und Krösus schien es angebracht, göttlichen Rat einzuholen. Also entsandte er Boten zu den wichtigsten Orakelstätten seiner Zeit. Ihre Aufgabe klang einfach. 100 Tage nach ihrem Aufbruch aus der lydischen Hauptstadt Sardis sollten sie den Priestern die Testfrage stellen, was der König am heutigen Tage mache. Nur das Apollon-Heiligtum in Delphi wusste die richtige Antwort: Er bereitet in einem ehernen Kessel ein Mahl aus einer Schildkröte und einem Lamm. Beeindruckt opferte Krösus dem Gott, beschenkte den Tempel und ließ sein eigentliches Anliegen vorbringen: Welche Folge hätte ein Präventivschlag gegen die Perser? Die Antwort lautete sinngemäß, Krösus werde ein großes Reich zerstören.

AUF EINEN BLICK

FORSCHEN IN DER PROVINZ

1 Das antike **Lydien** war ein kleinasiatisches Königreich des 8. bis 6. Jahrhunderts v. Chr., das noch wenig erforscht ist. Bislang konzentrierten sich Archäologen auf die Hauptstadt **Sardis**, neuerdings entdecken sie auch die Stätten des Umlands.

2 Griechische Geschichtsschreiber überlieferten nur spärliche Informationen zur lydischen Kultur, hauptsächlich die Legende um den letzten König **Krösus**, der Persien im Krieg unterlag.

3 Jüngsten archäologischen Funden zufolge ähnelten die lydischen Siedlungen einander: Es gab eine **Akropolis** und eine **Unterstadt**, in der Wohnräume und Werkstätten oft im gleichen Haus lagen; die Haupttempel waren der Göttin **Kybele** geweiht; Vornehme wurden in **Grabhügeln** um den Ort beigesetzt.

Siegesgewiss ordnete er die Mobilmachung an und überquerte bald darauf mit seinem Heer den Grenzfluss Halys. Bei der Stadt Pteria trafen sie um 547 v. Chr. auf die persische Armee, doch die Schlacht endete unentschieden. Mit dem Einbruch des Winters zog sich Krösus nach Sardis zurück und entließ vorerst seine Truppen. Kyros aber trotzte der Kälte und setzte ihnen nach. Auf dem Schlachtfeld klar überlegen, trieb er die Lyder hinter ihre Stadtmauer. Nach nur 14-tägiger Belagerung fiel Sardis, und Krösus geriet in Gefangenschaft. Damit hatte er wahrhaft ein großes Reich zerstört – sein eigenes. Lydien wurde persische Provinz.

Schon in der Antike erfreute sich Krösus' tragisches Geschick großer Beliebtheit bei Sängern und Dichtern. So existieren verschiedene Versionen über sein weiteres Schicksal, in denen er häufig durch das Eingreifen der Götter vor dem Tod gerettet wird. Trotz der Überlieferungen aber war Historikern und Archäologen unserer Zeit bis vor wenigen Jahren nur wenig über sein Volk und die lydische Kultur bekannt. Das meiste davon basiert auf Ausgrabungen in Sardis, wohingegen das übrige Reichsgebiet – das immerhin zur Blütezeit fast den gesamten westlichen Teil der heutigen Türkei umfasste – erst seit Kurzem erschlossen wird.

Die Hauptstadt war vermutlich 1444 durch den italienischen Kaufmann Cyriacus von Ancona (1391–1455) wiederentdeckt worden. Dieser hatte auf seinen Reisen antike Stätten aufgesucht und gezeichnet, was er dort vorfand, sowie antike Inschriften kopiert. Auch der französische Adlige Jean-Baptiste Tavernier wandelte auf Krösus' Spuren. Er identifizierte 1670 die Ruinenstätte nach ihrer Lage zwischen den Flüssen Hermos und Paktolos als das von antiken Chronisten beschriebene Sardis.

Wissenschaftliche Ausgrabungen unternahmen erstmals Archäologen der Princeton University unter der Leitung von Howard C. Butler zu Anfang des 20. Jahrhunderts. Und es waren amerikanische Forscher wie George M. A. Hanfmann von der Harvard University oder Nicholas D. Cahill

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK

Im 6. Jahrhundert v. Chr. erreichte das lydische Reich unter den Königen Alyattes und Krösus seine größte Ausdehnung.

von der University of Wisconsin-Madison, die diese Arbeit fortführten.

Weil die Siedlungsschichten des 6. Jahrhunderts v. Chr. dort in der Regel von jüngeren, meist aus nachchristlicher Zeit stammenden überlagert sind, gelang es bisher nur an wenigen Stellen, die alte lydische Hauptstadt frei zu legen. Auf dem Burgberg, der mit seinen steilen und felsigen Abhängen die Stadt überragt, haben offenbar nur wenige Reste von Terrassenmauern die Brandschatzung durch die Perser oder die Baumaßnahmen der folgenden Epochen überstanden. Vermutlich erhoben sich dort einst der lydische Königspalast, die Tempel und weitere Gebäude, die den Angehörigen der Elite vorbehalten waren. Darauf deuten beispielsweise luxuriöse Objekte im Fundgut hin: Tierfiguren, die einst bronzene Gefäße zierten, teures Importgeschirr sowie Münzen aus Silber oder der natürlich vorkommenden Gold-Silber-Legierung Elektron.

Auch mit roter, blauer und weißer Farbe bemalte oder mit aufwändigen Reliefs verzierte Terrakottaplatten zeugen vom damaligen Wohlstand. Sie schmückten wahrscheinlich einst als Friese die Lehmziegelmauern eines lang gestreckten Gebäudes, das auf einem Fundament von Bruchsteinen stand. Das Dach war mit bemalten Ziegeln gedeckt und weiterem Terrakottaschmuck versehen. Gebäudetyp und Verzierung lassen nach Ansicht der Ausgräber erahnen, dass dies nicht bloß die Wohnstatt eines Sterblichen gewesen ist, sondern ein Tempel der Kybele, die der griechischen Artemis entsprach. Das würde gut passen, berichtete Herodot doch von einem solchen Bauwerk in Sardis. Überdies hatte König Krösus eine besondere Beziehung zu dieser Göttin, denn er ließ ihr in Ephesos einen so großen Marmortempel errichten, dass dieser in der Antike als ein Weltwunder galt.

Zu Füßen der Akropolis erstreckte sich die weitläufige Unterstadt. Auch sie wurde bei der Eroberung durch die Perser ein Raub der Flammen, aber die einstürzenden Gebäude be-

STAATLICHE ANTIKENSAMMLUNGEN UND GLYPTOTHEK, MÜNCHEN / FOTO: RENATE KÜHLING; MIT FRDL. GEN. VON OLIVER HÜLDEN

Als Lydion bezeichnen Archäologen einen bauchigen Gefäßtyp mit hohem Fuß, langem Hals und waagrecht davon abgehender Lippe, der in Lydien erfunden wurde und dort weit verbreitet war. Zwar wurde diese Form von griechischen Töpfern kopiert, dennoch sind Fragmente solcher Gefäße im Fundgut ein Indiz für einen lydischen Hintergrund der jeweiligen Stätte.

TODD BOLEN / BIBLEPLACES.COM

TODD BOLEN / BIBLEPLACES.COM

Einer der größten griechischen Tempel wurde um 300 v. Chr. in Sardis der Göttin Artemis errichtet (links und unten), nachdem die persischen Besatzer durch Alexander den Großen vertrieben worden waren. Auch der lydische König Krösus hatte ihr ein Heiligtum bauen lassen – Hinweise fanden sich auf der Akropolis (links im Hintergrund). Zwischen dieser und der griechischen Ruine graben Forscher die Unterstadt mit Wohngebäuden, Werkstätten, weiteren Tempeln und einer Stadtmauer aus (unten).

gruben das Inventar lydischen Alltags unter sich. So hat sich einiges über die Jahrhunderte bewahrt, darunter einfache Schüsseln zum Bereiten der Mahlzeiten ebenso wie das schön dekorierte Tafelgeschirr Wohlhabender, Behältnisse für Parfüm oder Salben wie auch rituell genutzte Miniaturgefäße. Vieles davon war bei seiner Entdeckung noch so gut erhalten, wie man es sonst allenfalls in Gräbern vorfindet. Die meiste Keramik hatten Handwerker in Sardis selbst produziert, wie Form und Dekoration zeigen, zudem gab es Importwaren, die großenteils aus den griechischen Koloniestädten der kleinasiatischen Westküste stammten.

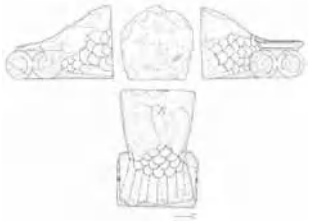
Goldland Lydien

Darüber hinaus fanden sich alle Arten von Haushaltsgegenständen wie Webgewichte, eiserne Spieße zum Braten von Fleisch, aber auch allerlei Schmuck. Manches davon dürfte direkt in den Wohnhäusern hergestellt und dort verkauft worden sein. Sogar eine Goldwerkstätte kam ans Licht, in der das Edelmetall geschmolzen und weiterverarbeitet worden sein konnte. Man gewann es aus dem Sediment des vorbeifließenden Paktolos, der es in der Legierung mit Silber, also als Elektron, mit sich führte. Dieses Gold bildete eine der Grundlagen für den Reichtum und die Macht der Lyder.

Vermutlich standen in der Unterstadt ebenfalls ein Palast und ein Tempel. Dafür sprechen Fragmente architektonischer Zierelemente, die in späterer Zeit zweckentfremdet und anderweitig erneut verbaut wurden. So entdeckten die Archäologen in jüngeren Siedlungsschichten Reliefs und Skulpturen, welche zumindest in einem Fall die in Lydien verehrte Muttergottheit Kybele darstellen. Wesentlich häufiger trafen sie noch auf Attribut-Tiere wie den Löwen. Er ist so oft als Motiv genutzt worden, dass er gewissermaßen zum Wappentier der Lyder avancierte.

Eine gewaltige, zwischen 18 und 20 Meter dicke und bis zu 13 Meter hohe Befestigungsmauer schützte Sardis bis zur Eroberung; auch sie war aus Lehmziegeln auf einem Steinsockel errichtet worden. Ein kleines Teilstück davon samt einem Tor sowie einiger benachbarter Häuser haben die amerikanischen Archäologen in den letzten Jahren frei gelegt. Dabei stießen sie wieder auf Spuren der Katastrophe: meterdicke Schichten von Asche und Schutt sowie einige Schwerter, Helme und Pfeilspitzen – und die Skelette zweier Soldaten, die von der einstürzenden Mauer begraben worden waren. Einer hielt zum Zeitpunkt seines Todes offenbar noch einen Stein in seiner Faust, wohl ein Wurfgeschoss.

Welchen Wohlstand Sardis vor diesen dramatischen Ereignissen besaß, demonstrieren die Grabhügel (so genannte Tumuli) außerhalb der Stadtmauer. Nur die Großen des Reichs konnten sich dergleichen leisten: Eine steinerne Grabkammer mit Satteldach nahm den Leichnam und die Beigaben auf, darüber wurde ein Hügel aufgeschüttet. Ein langer Gang



In einer aufgelassenen Apfelplantage auf der Halbinsel im See Gölhisar kamen diese Bruchstücke einer ursprünglich wohl gut zwei Meter großen Vogelskulptur zum Vorschein. Die Forscher vermuten, dass sie einen Falken darstellte, eines der Attribut-Tiere der in ganz Kleinasien, im lydischen Reich aber besonders verehrten Muttergottheit Kybele.

BEIDE FOTOS UND ZEICHNUNG: OLIVER HÜLDEN

führte ins Innere, eine Steinmauer umgürtete den Tumulus, und ein Stein, der an einen Phallus erinnert, bildete die Bekrönung des Hügels. Seit Jahrhunderten wurden und werden diese Grabbauten leider aufgebrochen und geplündert – auf der Suche nach den sagenhaften Schätzen des für seine Reichtümer berühmten Königs Krösus.

So bemerkenswert die Entdeckungen auch sein mögen, liefern sie doch für Sardis kein geschlossenes Bild, und die Peripherie des Reichs ist noch viel unbekannter. Daher war es ein glücklicher Zufall, der den damals noch in Heidelberg ansässigen Inschriftenspezialisten Thomas Corsten 1995 in die Kibyratis führte.

Der Name der Region verweist eigentlich auf eine Zeit lange nach den Lydern: Kibyra, heute eine eindrucksvolle Ruine nahe der modernen Kleinstadt Gölhisar, wurde nämlich erst in hellenistischer Zeit (wohl im 3. Jahrhundert v. Chr.) gegründet und führte dann einen Städtebund an – die kibyratische Tetrapolis (siehe Karte S. 66), die dem Gebiet den Namen gab. Der antike Geograf Strabon (um 63 v. Chr. – 23 n. Chr.) aber berichtete, Kibyra sei keine Neugründung gewesen. Vielmehr habe man eine lydische Vorgängersiedlung verlegt. Inzwischen Professor für Alte Geschichte in Wien, beschloss Corsten gemeinsam mit dem Autor, nach diesem Alt-Kibyra zu suchen.

Gut drei Kilometer von der heutigen Stadt entfernt liegt der See Gölhisar mit einer felsigen Halbinsel. Kurzfristig erregte deren Umgebung in den 1980er Jahren Aufmerksamkeit, als Mitarbeiter des Archäologischen Museums der türkischen Provinzhauptstadt Burdur erfuhren, dass dort antike Gräber ausgeraubt worden waren. Bei Notgrabungen stießen sie neben diversen anderen Funden auf etliche vollständige Gefäße, deren Vielfalt, Qualität und Zusammensetzung Anlass zu Spekulationen gab. Beispielsweise nahm der britische Archäologe Alan Hall die Halbinsel in Augenschein und glaubte den Ort mit der ebenfalls von Strabon erwähnten Siedlung Sinda identifizieren zu können. Wo Hall aufhörte, setzten wir an und unternahmen 2008 die ersten Surveys auf der Insel und im Umfeld des Sees. Ein Survey umfasst die Begehung des Geländes nach einem festgelegten Raster, bei der alle Oberflächenfunde genau verortet und notiert werden.

Auf den Spuren einer vergangenen Welt

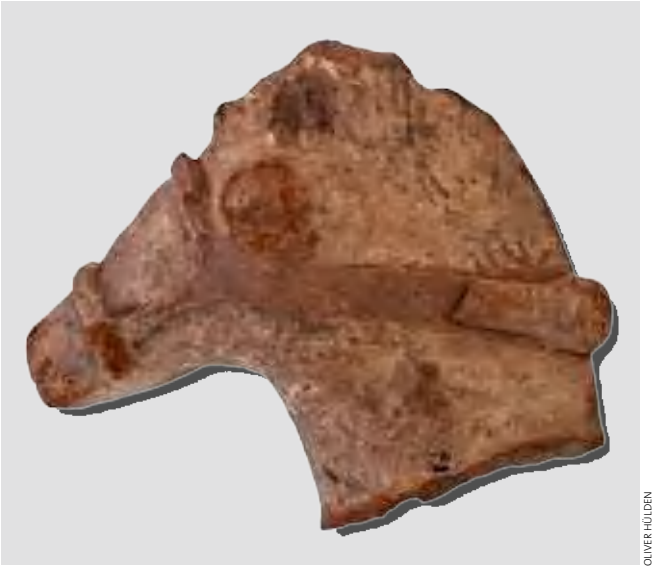
Heute allerdings zeugt nur noch wenig auf der Halbinsel von einer Stätte des Altertums: wenige, halb verfallene Mauern, verstreut herumliegende Bruchstücke antiker Architektur und in den Fels geschlagene Kammern. Das geübte Auge erkennt darüber hinaus Bereiche, wo das ursprünglich unebene Gelände für ein Bauvorhaben plan abgearbeitet wurde, und identifiziert Grundmauern. In einer modernen, verwilderten Apfelplantage fanden sich zudem tausende Fragmente von zumeist bemalten Keramikgefäßen. Großenteils stammen sie aus der archaischen Periode und lassen sich in die Zeit vom 7. bis zum späten 6. Jahrhundert v. Chr. einordnen. Viele waren – das zeigten Vergleiche mit anderen Orten in diesem Teil Kleinasiens – in der Region hergestellt worden. Andere hatte man von weit her importiert, etwa aus

dem damals unter lydischer Kontrolle stehenden Karien an der Westküste, manches auch von den griechischen Städten Kleinasiens oder aus dem zentralanatolischen Raum. Ein kleines Pferdeköpfchen aus Terrakotta dürfte seinen Weg sogar von Zypern in die Kibyratis genommen haben (siehe Bild rechts).

Dass wir tatsächlich Alt-Kibyra auf der Spur waren, bestätigten Scherben typisch lydischer Gefäße. Hinzu kamen Bruchstücke von Tonplatten, die sich bei näherem Hinsehen als Teile genau solcher Terrakotten entpuppten, wie sie in Sardis ausgegraben worden sind. Damit aber nicht genug: Im Gestrüpp am Hang oberhalb der Apfelplantage stieß eine Studentin auf eine zerbrochene Skulptur aus Kalkstein (siehe Bilder links). Man erkennt noch ein stilisiertes Gefieder – das Stück gehört zu einer überlebensgroßen Vogelstatue. Vergleiche mit ähnlichen Kunstwerken ermöglichten eine Einordnung in das 6. Jahrhundert v. Chr. und den griechisch-lydischen Kulturraum. Eine der Parallelen dazu stammt erneut aus Sardis. Wahrscheinlich handelte es sich um einen Falken und damit um das zweite Attribut-Tier der Göttin Kybele neben dem Löwen. Eine solche Skulptur stand zweifellos in einem Heiligtum und erklärt die kostbaren Terrakottaplatten, aber auch das Pferdeköpfchen – es war eine Weihgabe.

Inzwischen ist ebenso klar, dass die Siedlung wohl aus einigen dutzend Häusern aus Lehmziegeln bestand, die auf den natürlichen Geländeterrassen erbaut und durch ein System aus engen und teils steilen Gassen verbunden worden waren. Auf zwei sicher unter großen Mühen aus dem Fels geschlagenen Plateaus, rund 40 Meter über dem See, ragten vermutlich repräsentative Bauten auf, darunter vielleicht das erwähnte Heiligtum. In ihrer Anlage dürfte die Siedlung also Sardis durchaus geglichen haben, und das Leben lief hier wohl kaum anders ab, wenngleich auf provinziellem Niveau.

Den lydischen Hintergrund bestätigt schließlich auch die zugehörige Nekropole südlich des Sees: Gut 50 aus Steinen errichtete Grabhügel wurden dort an den Hängen dokumentiert, allerdings oft kaum noch zu erkennen, da von Raubgräbern zerstört oder zum Bau der Häuser eines nahe gelegenen türkischen Dorfs abgetragen. Deshalb entdeckten wir auch nur Reste von Beigaben: archaische Keramik, die eisernen Radbeschläge eines Wagens, Teile bronzener Gefäße. Sechs der Tumuli besaßen noch ihre »Phallussteine« (siehe Bild unten). Wenn man sich vorstellt, wie diese Tumuli in der Antike die Landschaft um den See herum geprägt, ja dominiert haben müssen, wird klar, dass die Siedlung im lydischen Grenzland sicherlich bedeutend war. Und die zahlrei-



OLIVER HÜLDEN

Das Pferdeköpfchen aus Terrakotta gehörte wohl zu einer Weihgabe für Kybele, importiert aus Zypern und dargebracht im Tempel von Alt-Kibyra.

OLIVER HÜLDEN

Phallusartige Steine wie dieser standen einst auf lydischen Grabhügeln. Etliche solcher Tumuli hat man im Umkreis von Alt-Kibyra entdeckt. Leider wurden sie ohne Ausnahme schon in der Vergangenheit geplündert.

OLIVER HÜLDEN

Ein Löwenrelief ziert den Eingang dieses mutmaßlich lydischen Felsengrabes, Dutzende Kilometer von Alt-Kibyra entfernt.

chen Importfunde spiegeln eindrucksvoll ihre Außenkontakte wider.

Wie aber passt dieses »Alt-Kibyra« in das lydische Reichsgefüge? Wahrscheinlich handelte es sich um eine kleine Siedlung, die im Zuge der lydischen Eroberungen im Grenzland angelegt worden war, um das Gebiet zu kontrollieren, doch sind das noch Mutmaßungen. Zudem gibt uns die Stätte weitere Rätsel auf: Warum etwa datiert der Großteil der bislang gefundenen Keramik in die archaische Zeit, während die gut 300 Jahre bis zur Verlegung der Siedlung und Gründung des hellenistischen Kibyra im Fundgut viel weniger Widerhall finden? War die Stadt vielleicht größtenteils verlassen worden, weil sie nach dem Fall von Sardis gleichfalls dem Machthunger Kyros' II. zum Opfer fiel? Möglich wäre es, denn es ist überliefert, dass der persische General Harpagos für ihn auch das benachbarte Lykien unterwarf.

In die Lydienforschung ist Bewegung gekommen. Ein halbes Dutzend internationaler Projekte versucht in enger Vernetzung mittlerweile die offenen Fragen zu klären. Und ständig kommt Neues ans Licht: Inzwischen hat unser deutsch-österreichisches Team rund 90 Kilometer nördlich des Sees Gölhisar bei Yeşilova eine Befestigungsanlage aus Bruchsteinen auf einem Bergplateau entdeckt, die ungefähr aus der gleichen Zeit stammt. Einige Kilometer wiederum davon entfernt wurde in der Antike ein Grab in einen Felsen gehauen, dessen Eingang das Relief eines springenden Löwen und dreier Wildziegen ziert (siehe Bild oben). Der Stil legt eine Datierung in das 6. Jahrhundert v. Chr. nahe, und das ähnlichste Motiv findet sich – wer hätte es gedacht – auf einem marmornen Kybeleschrein aus Sardis.

DER AUTOR

Der promovierte Archäologe **Oliver Hülden** vom Institut für Klassische Archäologie der Ludwig-Maximilians-Universität München leitet das Kibyratis-Projekt gemeinsam mit dem Epigrafiker Thomas Corsten vom Institut für Alte Geschichte und Altertumskunde, Papyrologie und Epigrafik der Universität Wien. Finanziert wird das Projekt durch die Gerda Henkel Stiftung in Düsseldorf.

QUELLE

Cahill, N. D. (Hg.): The Lydians and Their World ,Istanbul 2010; erhältlich bei: Phoibos Verlag, Wien

WEBLINKS

www.klass-archaeologie.uni-muenchen.de/projekte/kibyratis/index.html
Das Kibyratis-Projekt im Internet

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1157704**

Jetzt im Handel.

REFORMATION Zum Umdenken gezwungen
PETERSDOM Der lange Streit der Architekten
KLEIDERORDNUNG Was trägt der Papst?

GEOTHERMIE

Energie aus der Tiefe

In Pilotanlagen versuchen Ingenieure seit Jahren, die Wärme des Erdinneren mit Hilfe von Kraftwerken nutzbar zu machen. Doch abseits vulkanischer Zonen bleibt der Beitrag dieser Technologie noch überschaubar.

Von Karl Urban

Zum Verweilen lädt das Schild nicht gerade ein: »Achtung: Geothermiegebiet – Explosionsgefahr.« Der schweflig-gelbe Boden nahe dem Weiher Krýsuvík im Südwesten Islands ist so heiß, dass Quellwasser aus Schlammlöchern blubbert. Vorsichtig durchqueren wir auf einem glitschigen Holzpfad das Naturspektakel. Es stinkt nach faulem Ei und Schwefel – vulkanischen Ausdünstungen aus den Tiefen der Erde.

Ungastliche Landschaften wie diese sind es, die Island mehrheitlich mit einheimischer Energie versorgen. 62 Prozent seines Bedarfs deckt der Inselstaat aus dem Boden. Auf diese Weise beheizt er nicht nur Wohnungen, Schwimmbäder und die verschneiten Straßen von Reykjavík, Erdwärmekraftwerke liefern auch fast ein Viertel des benötigten Stroms. Andere Länder eifern diesem Vorbild seit Jahren nach, vor allem solche mit aktiven Vulkanzonen. Die gesamte elektrische Leistung der Geothermiekraftwerke weltweit entspricht der von rund elf Atomkraftwerken; 80 Prozent von ihnen stehen auf dem pazifischen Feuergürtel. Überall um den Stillen Ozean herum stoßen tektonische Platten aufeinander und befeuern die Inselvulkane von Japan, Indonesien, den Philippinen und Neuseeland. Aus den gleichen Gründen ist die Erdkruste auch unter den westlichen USA, El Salvador oder Mexiko so heiß, dass sich hier geothermische Stromerzeugung lohnt. Allein diese Länder planen bis 2015, ihre Geothermiekapazität um weitere zwei Drittel auszubauen.

Dabei gilt: Wenn man nur tief genug bohrt, gibt es auch anderswo ausreichend heißes Gestein. In Deutschland bemühen sich Pioniere seit Jahrzehnten, die noch weit gehend unerschlossenen Tiefen zu verstehen und für die Energieversorgung zu erschließen. Der Erfolg ist bislang mäßig. So waren im Musterland für den schnellen Ausbau erneuerbarer Energien Anfang 2012 gerade mal 7,3 Megawatt am Netz, entsprechend der Nennleistung weniger Windräder. Dabei ist die Erdkruste hier zu Lande in wenigen Kilometern Tiefe eigentlich genauso heiß wie in den brodelnden Schlammtöpfen Islands. Denn sie wird überall beständig von unten beheizt.

Seitdem die Erde vor rund 4,6 Milliarden Jahren entstand, fungiert der Erdkern als Wärmemotor des Planeten. Sein äußerer Teil ist flüssig und rund 5000 Grad Celsius heiß. Der große Temperaturunterschied zur Oberfläche bewirkt, dass sich im festen Erdmantel gewaltige Konvektionsströme umwälzen, die beständig thermische Energie vom Erdinneren nach oben transportieren und nebenbei die Plattentektonik in der Erdkruste am Laufen halten.

Für die Energieversorgung weniger vorteilhaft ist die Verteilung der geothermischen Wärme. Gut zwei Drittel davon treffen auf ozeanische Kruste. Vor allem entlang der Mittelozeanischen Rücken verpufft die Erdwärme damit kaum nutzbar für uns in die Weltmeere. Vulkaninseln auf diesen Meeresgebirgen wie Island oder Neuseeland stellen Ausnahmen dar. Dass die Erdkruste in stabileren kontinentalen Regionen überhaupt ausreichend warm ist, verdanken wir einer zusätzlichen Energiequelle in der Kruste selbst: Hier zerfallen nämlich seit Jahrmilliarden ständig natürlich vorkommende Uran-, Thorium- und Kaliumisotope. Die insgesamt nutzbare geothermische Wärme ist dadurch zwar nicht tatsächlich erneuerbar, wird sich aber in den kommenden Jahrtausenden kaum signifikant verringern.

Anfänglich ließ sich Erdwärme allerdings nur dort anzapfen, wo Magmakammern schlummern. Im toskanischen

AUF EINEN BLICK

TECHNIK MIT POTENZIAL – UND TÜCKEN

1 Mit der Tiefe nimmt die Temperatur im Inneren der Erde zu. Doch die Wärme ließ sich lange Zeit nur an ausgewählten Standorten nutzen. Deshalb stehen heute fast alle größeren **Geothermiekraftwerke** der Welt in Vulkangebieten.

2 Das Potenzial der Geothermie ist noch längst nicht ausgeschöpft. Derzeit entstehen viele neue Kraftwerke. Obwohl es in Deutschland kaum **vulkanische Tätigkeit** gibt, erschließen auch hier einige Pilotanlagen den heißen Untergrund.

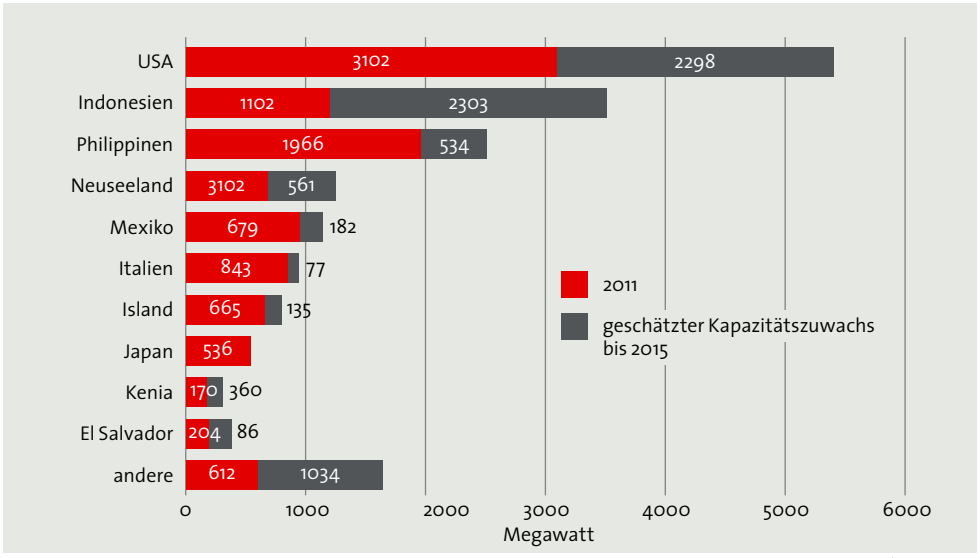
3 Die tiefe Erdwärme ist manchmal schwer zu bändigen. Vor der Bohrung wissen Experten selten, wie ergiebig der Untergrund ist. Auch können die Bohrungen **schwache Erdbeben** auslösen.

Vulkangebiet Lardarello etwa unternahm der italienische Geschäftsmann Piero Ginori Conti (1865–1939) im Jahr 1904 erste Versuche, aus dort ausströmendem Dampf über einen Dynamo Strom zu gewinnen. Dabei galt die Tiefenwärme selbst in Deutschland schon früh als Energiequelle der Zukunft. In der Anfangszeit der industriellen Revolution inspirierte sie Bernhard von Cotta (1808–1879) zu Prognosen für die Zeit nach Erschöpfung aller Kohlelager: Die »Innenwärme der Erde«, meinte der Geologe und Bergbauexperte, solle dann zur Oberfläche geleitet und dort »zur Erwärmung der Wohnungen oder selbst zur Heizung von Maschinen verwendet« werden.

Damals wussten die Bergleute bereits, dass die Erde immer heißer wird, je tiefer sie gruben. Pro Tiefenkilometer wächst die Temperatur durchschnittlich um 30 Grad Celsius. Eine Bohrung in drei Kilometer Tiefe müsste somit bereits auf gut 100 Grad Celsius heißes Gestein stoßen. Wie diese Wärme an die Oberfläche gebracht werden könnte, war jedoch längst noch nicht geklärt. Auch die geothermischen Besonderheiten mussten Geologen erst im Detail verstehen, denn der Wärmestrom unter der Bundesrepublik ist durch tektonische Prozesse mancherorts erhöht. Im Oberrheingraben steht die europäische Erdkruste unter Spannung. Sie zerbricht dort zwar nicht völlig, ist aber dünner und heißer.

Das Geothermiekraftwerk Nesjavellir steht 30 Kilometer östlich von Reykjavík. Es versorgt Islands Hauptstadt mit Strom und heißem Brauchwasser.

SHUTTERSTOCK / COREPICS



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: RUGGERO BERTANI, INTERNATIONAL GEOTHERMAL ASSOCIATION (IGA) / GEOTHERMAL ENERGY ASSOCIATION (GEA) & ÍSLANDBANKI, 2011

Die weltweite geothermische Leistung wird derzeit mit hoher Geschwindigkeit ausgebaut. Alle stark profitierenden Länder besitzen Zugang zu aktiven Vulkanzonen.

Anderswo wird die Kruste dagegen nicht auseinander gezerrt, sondern von oben gestaucht. Das gewaltige norddeutsche Becken füllte sich über hunderte Jahrmillionen mit Sedimenten, die immer schwerer auf der tektonischen Platte lasteten. Das passierte auch am Rand von Südbayern und des Allgäus, wo sich die Alpen auftürmten. Viel Gesteinsschutt rollte die Hänge hinab in das Molassebecken am Alpennordrand. Das drückte im Vorgebirgsraum die Erdkruste zusammen und machte sie für den Wärmestrom aus dem Erdinneren durchlässiger.

Eine umfassende Bestandsaufnahme erstellte das Büro für Technikfolgen-Abschätzung (TAB) 2003 für den Deutschen Bundestag – und attestierte unserem vulkanisch inaktiven Land enorme geothermische Energiereserven. Demnach ließe sich mit vorhandener Technik die riesige Energiemenge von 1200 Exajoule für die Stromgewinnung aus dem Untergrund fördern. Selbst wenn daraus permanent die Hälfte des einheimischen Strombedarfs gedeckt würde, bliebe das Reservoir über 1000 Jahre lang nutzbar.

Für die ersten Geothermiekraftwerke mussten Ingenieure zwei Probleme lösen: die Schwierigkeit, zuverlässig kilometertiefe Löcher zu bohren, sowie das Salz im Grundwasser. Durch die Bohrlöcher können sie heißes Wasser aus tiefen Grundwasserleitern entnehmen, das im Kraftwerk zur Strom- und Wärmeproduktion abgekühlt wird. Danach gelangt es durch ein zweites Bohrloch in die Tiefe zurück, um sich dort erneut zu erhitzen. Jedoch ist das förderbare Thermalwasser hier zu Lande durch seinen hohen Salzgehalt ungeeignet, direkt eine Dampfturbine anzutreiben. Um Strom zu gewinnen, wird die Wärme in einem Zwischenschritt deshalb auf eine zweite Flüssigkeit übertragen. Das ist meist ein organisches Lösungsmittel mit einem deutlich niedrigeren Siedepunkt. Erst durch diesen so genannten Organic Rankine Cycle (ORC) und die verwandte Kalinatechnik auf Ammoniakbasis gelang es vor wenigen Jahren, mit ersten Kraftwerken neben Heizwärme auch Strom zu produzieren.

Das erfolgreichste von ihnen steht südlich von München: Im Vorort Unterhaching erschloss ein kommunaler Energieversorger ab 2004 eine Tiefenschicht aus Kalkstein. Abgelagert in der späten Jurazeit, hatte sich das Gestein in 3,5 Kilometer Tiefe im Lauf seiner Geschichte zersetzt. Dadurch wurde dieser so genannte Karst porös und für Thermalwasser durchlässig. Über eine Bohrung fördert das Kraftwerk heute bis zu 150 Liter Wasser pro Sekunde mit einer Temperatur

Technologie	elektrische Leistung		Jahresproduktion		Verfügbarkeit
	GW	Prozent	TWh	Prozent	Prozent
Wasserkraft	1010	76,4	3716	83,0	42
Biomasse	62	4,6	282	6,3	52
Wind	198	14,9	364	81	21
Geothermie	11	1,1	67	1,5	77
Fotovoltaik	40	3,0	49	1,1	14
Total	1321	100	4478	100	

Unter den erneuerbaren Energien stellt die Geothermie weltweit noch einen kleinen Anteil. Wegen ihrer äußerst stetigen Verfügbarkeit ist sie als Energieform dennoch gefragt.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: LADISLAUS RYBACH UND REN21, RENEWABLES 2011 GLOBAL STATUS REPORT

von über 120 Grad Celsius und pumpt es dann abgekühlt über ein zweites Loch in die Tiefe zurück. Jährlich gewinnt es dabei 47 Gigawattstunden Heizwärme und versorgt damit zwei Drittel der Kleinstadt. Nebenbei produziert es rund 22 Millionen Kilowattstunden Strom – genug für ein Viertel der örtlichen Privathaushalte.

Künstliche Risse für die Durchlässigkeit

Etwas anspruchsvoller waren die Arbeiten für das Kraftwerk in Landau in der Pfalz, das 2007 ans Netz ging. Denn im Oberrheingraben gibt es in der Tiefe kein ergiebiges und heißes Grundwasserreservoir. Geologen wussten nur, dass tektonische Kräfte das Gestein vor Jahrmillionen zerbrochen und damit etwas durchlässiger für Wasser gemacht hatten. Deshalb pumpten die Betreiber nun selbst Wasser in drei Kilometer Tiefe, um einige weitere Risse für hindurchströmendes Wasser zu schaffen, das dann die Wärme aufnehmen sollte. Das gelang in Grenzen: Mit durchschnittlich 60 Litern pro Sekunde fördern die Pumpen deutlich weniger heißes Wasser als in Unterhaching. Immerhin werden seitdem aber drei Megawatt elektrische Leistung bereitgestellt und einige hundert Haushalte mit Wärme versorgt.

Kraftwerke dieser Art reichen aber kaum aus, um den prognostizierten Schatz zu heben: Laut der TAB-Studie macht tiefes Thermalwasser wie in Unterhaching gerade mal ein Prozent, teilweise durchlässige Störungszonen wie in Landau nur vier Prozent des technischen Potenzials der tiefen Geothermie aus. Die verbleibenden 95 Prozent bestehen aus heißem, aber extrem dichtem Gestein, das kaum Wasser führt.

Dieses Problem war bereits in den 1960er Jahren bekannt. Schon damals tauchte die Idee auf, den dichten Untergrund für Wasser durchlässiger zu machen. Früh war klar, dass das nur mit roher Gewalt ging. Der US-Physiker George Kennedy erwog 1964 sogar, das Gestein mit einer unterirdischen

Im bayerischen Dürrnhaar wurde von 2007 bis 2009 nach Erdwärme gebohrt. Die rund 4500 Meter tiefe Bohrung erschließt mit dem Malmkarst ein ergiebiges Reservoir für heißes Tiefenwasser. Im Münchener Raum hat diese Schicht einen Geothermieboom für die lokale Energieversorgung von Privathäusern ausgelöst.

MIT FRDL. GEN. DER HERRENKNECHT AG

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK, NACH ORKUSTOFNUN, NATIONAL ENERGY AUTHORITY OF ICELAND, 2009

Viel versprechende Geothermieregionen liegen entlang aktiver tektonischer Plattengrenzen. Aber auch fernab von diesen, wie in Deutschland oder Australien, kann die Tiefenwärme mit neuen Methoden genutzt werden.

Atombombe zu zertrümmern. Eine zweite Idee verschwand dagegen auch mit dem Ende der Nukleareuphorie nicht in den Schubladen: Wasser sollte mit hohem Druck in die Tiefe gepresst werden, um dort das Gestein großflächig zu zertrümmern. Dieses »Fracking« genannte Verfahren nutzten Erdölunternehmen zunächst, um im Gestein fest gebundene Rohstoffe zu lösen (siehe Spektrum der Wissenschaft 8/2012, S. 72). Doch mit der gleichen Technik lässt sich auch ein künstlicher Grundwasserleiter schaffen. Durch ihn kann dann Wasser strömen, um die Hitze des Gesteins aufzunehmen, bevor es wieder hochgepumpt wird.

Bis Ingenieure solche verbesserten geothermischen Systeme (Enhanced Geothermal Systems, EGS) überhaupt erzeugen konnten, bedurfte es mehrerer Anläufe. Am US-amerikanischen Los Alamos National Laboratory – dem Entwicklungsort der ersten Atomwaffen – zerklüfteten sie zunächst das Gestein tief in einem alten Vulkanschlot mit Wasser. Es gelang den Forschern aber nicht, die Risse aus verschiedenen Bohrungen miteinander zu verbinden, um dauerhaft Wasser hindurchschicken zu können. Ein späteres Experiment im japanischen Hijiori westlich von Sendai misslang dann; zwei Bohrungen im Untergrund waren sich zu nahe gekommen. Es entstand ein hydraulischer Kurzschluss, wodurch hineingepresstes Wasser direkt in das zweite Bohrloch drang, ohne sich unterwegs ausreichend erwärmen zu können.

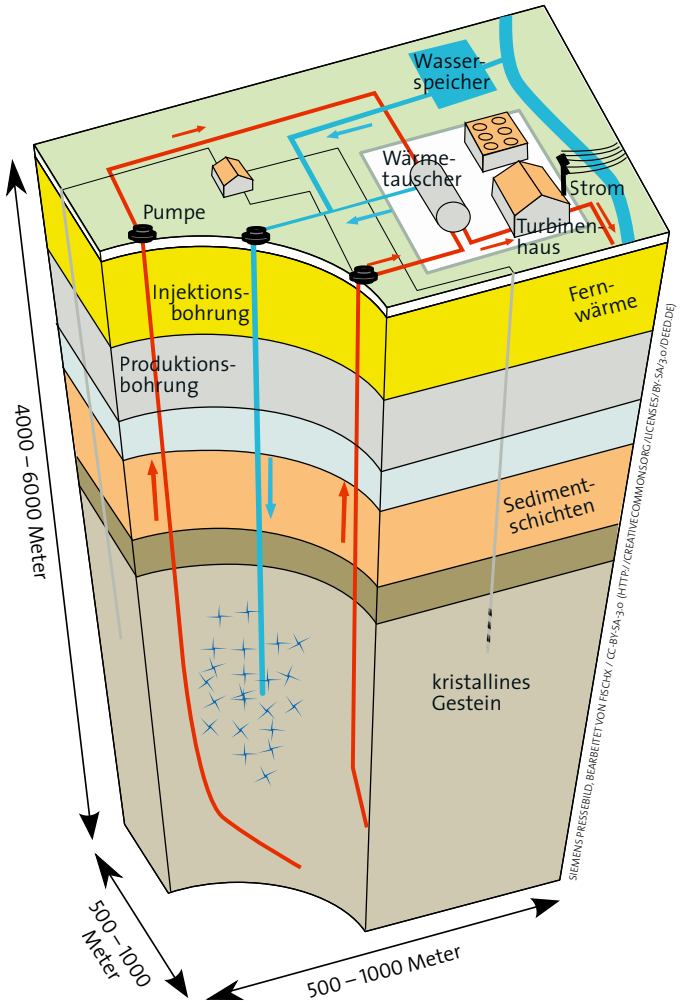
Ein europäisches Forschungskraftwerk entstand ab 1987 im elsässischen Soultz-sous-Forêt. Hier stießen die Ingenieure in das so genannte Grundgebirge vor, um die Granite hydraulisch durchlässiger zu machen. Das Ziel der Anlage war von Anfang an, vor allem die dabei im Gestein ablaufenden Prozesse genau zu analysieren. Sie speist deshalb zwar nur bescheidene 1,5 Megawatt ins Stromnetz ein. Dennoch eifern heute weltweit mehrere EGS-Projekte den Erfolgen aus dem Elsass hinterher. Immerhin hatte sich erstmalig ein nutzbares Rissgeflecht mit einer Fläche von drei Quadratkilometern gebildet. Das war mit Messungen schwacher Erschütterungen an der Erdoberfläche nachgewiesen worden.

Diese für Menschen kaum wahrnehmbaren Erschütterungen sind ein wichtiges Diagnosewerkzeug, entstehen sie doch unvermeidlich beim Einpressen des Wassers. Wird der Druck im Bohrloch richtig geregelt, verästeln sich die Risse und bilden so einen optimalen Wärmetauscher im dichten Gestein. Ist er dagegen zu hoch, verstärken sich die Mikrobeben, die dann auch für Menschen spürbar werden. Das mindert die Akzeptanz für die Zukunftsenergie rapide, was sich beim ersten kommerziellen EGS-Kraftwerk Europas am Stadtrand von Basel zeigte. Die Ingenieure begannen 2006 mit Hochdruck Wasser in die Tiefe zu pumpen, kontrollierten aber die Reaktion der Seismometer nicht genau genug. Das darauf folgende Erdbeben erreichte eine Magnitude von 3,4, woraufhin der

Geschäftsführer angeklagt wurde, ein Erdbeben mutwillig in Kauf genommen zu haben. Er wurde am Ende zwar freigesprochen – das Pilotkraftwerk jedoch dichtgemacht.

Die Anlage im pfälzischen Landau erhielt ab 2009 ebenfalls starken Gegenwind, als in der Stadt ein spürbares Beben auftrat. Mit einer Stärke von 2,7 war es zwar zehnmal schwächer als das in Basel, gleichwohl überraschte es Anwohner wie Betreiber. Bald darauf formierten sich im Oberrheingraben mehrere Bürgerinitiativen, die sich gegen ähnliche geplante Vorhaben engagierten. Die Landesregierung von Rheinland-Pfalz richtete daraufhin ein Mediationsverfahren ein, das nach über einem Jahr eine Einigung zwischen den meisten Gegnern und Befürwortern erbrachte. Demnach sollen Geothermieanlagen zukünftig sehr viel transparenter geplant, gebaut und betrieben werden.

Aus der Sicht der Betreiber handelt es sich bei solchen spürbaren Beben lediglich um behandelbare Kinderkrankheiten einer jungen Technik. Sie bräuchten bis zu fünf Jahre, ein einzelnes Kraftwerk zu errichten. So habe die Zeit bisher kaum ausgereicht, die Reaktion des Tiefengesteins auf eingepresstes Wasser gut zu verstehen. Ein Grundproblem der Geologie: Bis heute lässt sich das Verhalten des Gesteins selten genau vorhersagen, bevor es tatsächlich angebohrt wird. Das belegte auch eine Forschungsbohrung in Hannover, mit der die Gebäude der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe beheizt werden sollten. Um das Gestein etwas aufzuweiten und dabei sein Bruchverhalten zu verstehen, pumpten die Geophysiker der Bundesanstalt Wasser mit besonders hohem Druck ins Gestein. Selbst die feinsten Seismometer registrierten dabei kaum Erschütterungen.



SIEMENS PRESSEBILD, BEARBEITET VON FISCHX / CC-BY-SA-3.0 (HTTP://CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY-SA/3.0/DEED.DE)

Pumpen, ohne Erschütterungen auszulösen

Die Forscher versuchen nun, anhand der Messdaten aus Hannover und anderer Bohrungen ein Reaktionsmuster angepasst für andere Regionen abzuleiten. Es soll dann bei zukünftigen Bohrungen helfen, dass das Wasser so rasch wie möglich hinabgepumpt wird, ohne spürbare Erschütterungen hervorzurufen. Um das sicherzustellen, misst schon heute ein dichtes Netz aus Seismometern an jedem neuen Bohrloch, wie stark die Erdoberfläche schwingt, um damit die Arbeit an der Bohrstelle direkt zu steuern. Diese Herangehensweise erschwert aber die Tatsache, dass manchmal Tage bis Wochen vergehen, bis das ins Bohrloch gepresste Wasser tatsächlich die Erde erzittern lässt. Besonders im Oberrheingraben könnten sich deshalb spürbare Beben zukünftig kaum ganz ausschließen lassen. Zumindest müssten bei den Investitionskosten jedes Kraftwerks leichte Gebäudeschäden berücksichtigt werden.

Die Kosten der Tiefengeothermie sind aber bisher aus anderen Gründen unverändert hoch geblieben. Während die Einspeisevergütung für Solarstrom, Windkraft zu Lande und Bioenergie wegen technischer Fortschritte seit Jahren reduziert wird, stiegen die Fördersätze für die Erdwärme im Dezember 2011 das zweite Mal in Folge, zuletzt auf bis zu 25 Cent pro eingespeister Kilowattstunde Geothermiestrom. Eigentlich verfolgt das deutsche Erneuerbare-Energien-Gesetz aber das Ziel, Technologien mit sinkenden Zuschüssen marktfähig zu machen.

Die Geothermiebranche stößt allerdings immer wieder auf neue Probleme. So bohrten die Planer bei der Anlage in Landau ihre zwei Löcher zwar in ausreichendem Abstand in die wärmespendende Störungszone, damit das eingepresste Wasser aus dem Kraftwerk nicht zu schnell das Wasser an der Förderbohrung abkühlt. Einen solchen hydraulischen Kurzschluss hatte es im japanischen Hijiori ja schon einmal gegeben. Aber gerade diese Vorsicht löste nun in Landau spürbare Erschütterungen aus: Das zurückgeleitete Wasser traf in der Tiefe auf das wenig durchlässige Gestein der Störungszone. Dort baute sich ein zu hoher Druck auf, was die Betreiber letztlich dazu zwang, ihre Pumpen auf Dauer stark zu drosseln. Eine Lösung ist jedoch in Sicht, die auch die ursprünglich geplante Effizienz des Kraftwerks wiederherstellen könn-

Mit »Enhanced Geothermal Systems« versuchen Ingenieure, auch trockenes Tiefengestein auszubeuten. Dafür wird Wasser mit hohem Druck ins Bohrloch gepresst, wodurch ein feines Rissgeflecht entsteht. Im so zerklüfteten Gestein kann später Wasser erhitzt und über weitere Bohrlöcher ins Kraftwerk geleitet werden.

te: Die zweite Bohrung soll in der Tiefe einen Seitenarm erhalten. Dabei entstünde eine weitere Möglichkeit, das kühle Wasser zurückzupumpen, was voraussichtlich das Tiefengestein vom Druck entlasten kann.

Selbst die geothermischen Musterschüler von Unterhaching würden heute mit mehr Bedacht in die Tiefe vorstoßen. Noch vor wenigen Jahren war es nicht einfach, die zerklüftete und damit ergiebige Thermalwasserzone der bayrischen Molasse zuverlässig anzubohren. Auf der Suche nach geeigneten Schichten setzen die Planer auf die Vibrationsseismik, die das tiefe Gestein mit Mess-LKWs durchleuchtet. Vor der ersten Bohrung entschied man sich in Unterhaching für eine relativ grobe zweidimensionale Tiefenkartierung. Seitdem erfuhr diese Technik allerdings einen massiven Entwicklungsschub. Ihre Ortsauflösung ist heute zehnmal höher, was den über ein Dutzend geplanten Geothermiekraftwerken im südlichen Bayern zugutekommt.

Eine größere Rolle wird die geothermische Stromerzeugung in den kommenden Jahren trotzdem nicht spielen. Die aktuelle Ausbaugeschwindigkeit müsste sich vervielfachen, um in einigen Jahrzehnten eine Stütze für eine saubere Stromversorgung zu werden (siehe Interview unten). Es gibt jedoch wenig Spielraum, die hohen anfänglichen Investitionskosten und damit auch den Preis pro Kilowattstunde zu senken. Die Hälfte der Kosten verschlingt allein die Bohrung – und nicht immer erreicht sie ausreichend heißes Gestein oder das erhoffte ergiebige Thermalwasser.

Die größte Bremse eines schnellen Geothermieausbaus benennt aber schon der TAB-Bericht von 2003: Der elektrische Wirkungsgrad der Kraftwerke ist mit rund 18 Prozent ge-

INTERVIEW

»Geothermie liefert Grundlaststrom«

Interview mit dem Geophysiker **Ladislaus Rybach,** Professor emeritus an der ETH Zürich

Spektrum der Wissenschaft: Sie gehören zu den Vordenkern der Geothermie seit den Anfängen in den 1970er Jahren. Damals trieben zwei Ölkrisen die Regierungen weltweit dazu, über alternative Energien nachzudenken. Wie haben Sie den Ausbau der Geothermie in Mitteleuropa seitdem verfolgt?

Professor Ladislaus Rybach: Es hat schon lange gedauert, bis wirklich Bewegung in die Branche kam. Ausgelöst wurde dies unter anderem durch die Einspeisevergütung in Deutschland, die mittlerweile in immer mehr Ländern eingeführt wird und zu einem Boom aller erneuerbaren Energien geführt hat. Das hat auch die Geothermie ein gutes Stück vorangebracht. Ich bin wirklich beeindruckt, welche Fortschritte das Gebiet zum Beispiel im Umfeld von München macht. Die zweite Entwicklung steht uns aber erst noch bevor: Denn natürliches heißes Tiefenwasser wie im südlichen Bayern gibt es bei Weitem nicht überall. Ganze Landstriche besitzen ausschließlich heißes und eher trockenes Tiefengestein. Aber dieses enthält trotzdem unvorstellbare Mengen an Wärme, die von der Erde auch ständig nachgeliefert wird.

Allerdings gibt es bis heute nur wenige Pilotprojekte, und nicht alle Vorhaben waren überhaupt erfolgreich. Haben die Ingenieure anfänglich die Probleme unterschätzt?

Rybach: Ob Thermalwasser vorhanden ist und auch genutzt werden kann, weiß man erst nach der Tiefenbohrung und dem darauf folgenden Fördertest. Deshalb gibt es auch immer wieder Misserfolge. Einen davon habe ich kürzlich in Zürich erlebt. Da hat man viel Geld investiert, und am Ende war die Bohrung nicht ergiebig genug. Man kann eben von der Oberfläche aus nicht eindeutig sagen, welche Beschaffenheit des Gesteins und welche Wasserführung in drei bis vier Kilometer Tiefe vorkommen.

Viele Ihrer Kollegen sehen den Ausbau der Geothermie in den nächsten Jahren trotzdem positiv und sagen, er wird sich bald stark beschleunigen. Warum hinkt die Geothermie den anderen erneuerbaren Energieträgern so deutlich hinterher?

Rybach: Lange Zeit war das gar nicht so. Geothermisch erzeugten Strom gibt es immerhin seit mehr als 100 Jahren. Bei der weltweit installierten Leistung hat uns erst 2007 die Fotovoltaik überholt. Selbst drei Jahre später speiste die

ring, so dass sie vergleichsweise warmes Wasser in den Untergrund zurückpressen, dessen Temperatur bloß für die Stromproduktion nicht mehr ausreicht. Stattdessen könnte die Wärme häufiger direkt an Haushalte und die Industrie verteilt werden als bisher. Aber das ist aufwändig und teuer. Dennoch versuchen die meisten Betreiber diesen Weg zu gehen. Die Unterhachinger etwa investierten gemeinsam in ein neues Fernwärmenetz. Weil aber die Gesamtkosten dafür höher sind als für die ganze Geothermieanlage, gelingt das nur bei Bohrungen in ausreichend dicht besiedelten Gebieten.

Parallel dazu gäbe es auch Abnehmer aus der Industrie: Dieses Potenzial berechneten Nils Kock und Martin Kaltschmitt vom Institut für Umweltfragen und Energiewirtschaft an der Technischen Universität Hamburg-Harburg. Demnach ließen sich Klärschlamm, Holzpellets und Lebensmittel

MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON HAUSHERR'S SÖHNE

Die Bohrgeräte arbeiten einige Monate lang, um in drei bis fünf Kilometer Tiefe vorzudringen. Dafür müssen die mit Industriediamanten gehärteten Bohrmeißel regelmäßig gewechselt werden.

Geothermie noch immer 40 Prozent mehr Strom ins Netz ein, einfach weil Erdwärme viel beständiger verfügbar ist als Sonnenschein. Aber das exponentielle Wachstum der Fotovoltaik hat nun dazu geführt, dass die Geothermie völlig abgehängt wurde. Die Fotovoltaik wächst global um 40 Prozent pro Jahr. Wir sind dagegen froh, im Jahr auf fünf Prozent Steigerung zu kommen.

Und das soll sich bald ändern?

Rybach: Wenn es nicht gelingt, maßgeschneiderte Wärmetauscher mit der EGS-Technologie (Enhanced Geothermal Systems) für den Untergrund zu entwickeln, wird es bei den geringen Wachstumsraten bleiben. Dafür sind die natürlichen heißen Quellen eben zu stark beschränkt. Mit künstlichen EGS-Durchlauferhitzern könnten wir dagegen überall Erdwärme anbieten und an sehr vielen Orten ganze Stadtteile mit Strom und Wärme versorgen.

Für diese Wärmetauscher wird mit hohem Druck Wasser eingepresst, um im Gestein die nötigen Risse zu erzeugen. Dadurch hat bei den ersten Pilotkraftwerken die Erde vereinzelt spürbar gebebt. In Basel wurde 2006 nach Erschütterungen sogar ein Kraftwerksprojekt eingestellt. Wie bewerten sie solche Fälle?

Rybach: In Basel hat man einmal einen Fehler gemacht, der freilich weit reichende Konsequenzen hatte. Seitdem sind in Deutschland viele Bürgerinitiativen entstanden, allerdings nicht nur gegen Geothermiebohrungen. Da gibt es auch Widerstand gegen die Tiefenlagerung von Kohlendioxid und die Gasförderung aus tiefem Tongestein, die ebenfalls Erschütterungen auslösen können. In der Schweiz hat die Geothermie mittlerweile solche Proteste überstanden, weil wir damit öffentlich richtig umgegangen sind. In Sankt Gallen ging eine Volksabstimmung mit 80-prozentiger Zustimmung deutlich zu Gunsten der Geothermie aus. Es gibt aber eben Vorbehalte bei den Leuten, entweder aus Unkenntnis oder aus Angst vor dem Unbekannten. Diese müssen wir ernst nehmen.

Können Sie den Menschen die Angst vor diesen Beben nehmen?

Rybach: Die Angst lässt sich nur überwinden, wenn wir problemlos laufende Anlagen vorweisen können. Ich habe selbst erlebt, wie es ist, wenn man Leute auf dem Kraftwerksgelände herumführt und sie ihre Hand an so eine Röhre legen kann und merken: Die ist ja heiß. Ich bin wirklich hoffnungsvoll, da derzeit entscheidende Länder energisch vorangehen. In den Vereinigten Staaten von Amerika gibt es schon mehrere Projekte, in denen Wärmetauscher gebaut werden; nun wird Australien aktiv. Dort scheinen die Ingenieure sehr darauf zu achten, ob und wie die Erdbeben erzeugt werden. Denn nur sehr leichte, nicht spürbare Erschütterungen sind technisch überhaupt erwünscht. Erst sie erzeugen im unterirdischen Reservoir das durchlässige und fein verteilte Kluftsystem, das wir für den Wärmeaustausch brauchen. Die größeren Magnituden versucht man bei den Mikrobeben ja gerade zu vermeiden, weil sie den Wärmetauscher verschlechtern, indem sie zu große Klüfte öffnen. Nicht nur in meinem Institut an der ETH Zürich arbeiten deswegen viele Leute daran, genau dieses Problem zu lösen: Wie lassen sich ausnahmslos kleine Risse erzeugen, ohne dass es an der Oberfläche spürbar bebt? Da ist die Forschung also dran.

Wenn die Geothermie mancherorts aber weiter auf gesellschaftlichen Widerstand stößt: Könnte man dort bei den doch eher geringen Wachstumsraten nicht auch auf sie verzichten?

Rybach: Alle Länder, die nun die Kernenergie zurückfahren, sind dringend auf alle Alternativen angewiesen. Das bedeutet nicht nur Geothermie, aber sie muss im Energiemix der Zukunft dabei sein. Denn geothermische Kraftwerke liefern im Unterschied zu Wind- und Sonnenenergie den wichtigen Grundlaststrom. ~

Die Fragen stellte **Karl Urban**.

mit geothermischer Abwärme trocknen. Auch wenn sich diese Industrien dafür nahe der Erdwärmequelle niederlassen müssten, könnte es sich lohnen. Denn bisher decken deren Bedarf an Niederenergiewärme vor allem fossile Energieträger, die immer teurer werden.

Andere Staaten haben diesen Schritt bereits vollzogen: Auf Island rieselt schon aus der Dusche allmorgendlich schwefelig riechendes Thermalwasser – und selbst im Winter bieten die Supermärkte einheimische Tomaten, angebaut in geothermisch beheizten Gewächshäusern. Dabei gibt es selbst auf der Vulkaninsel noch Ausbaupotenzial. Energieunternehmen versuchen etwa in einem kühnen Vorhaben zu ergründen, ob sich nicht noch viel heißere Wärmespeicher anzapfen lassen als bisher. Das Iceland Deep Drilling Project soll unter der Vulkaninsel Wasser fördern, das zwischen 400 und 600 Grad Celsius heiß ist. Dabei geht es in einen überkritischen Zustand über, in dem Dampf- und Flüssigphase nicht mehr zu trennen sind – was neue Probleme schafft.

Theoretisch würde das die elektrische Leistung eines Geothermiekraftwerks vervielfachen und dem Bereich moderner Kohlekraftwerke erreichen. Auch bei diesen treibt überkritisches Wasser eine Turbine an, weil deren Kessel ausreichend stark befeuert wird. Doch in freier Natur ist das nicht ganz so einfach. Schon die Bohrkrone müsste gut gekühlt werden, um solcher Hitze im Gestein dauerhaft standzuhalten. Außerdem müssten die Rohre auf dem kilometerlangen Weg nach oben perfekt isoliert sein, damit der Wasserdampf unterwegs nicht zu stark abkühlt.

Ein Forscherteam war 2009 im Norden Islands sogar schon auf einem guten Weg dorthin: Mitten im Krafla-Vulkansystem bohrte es ein neues Loch. Doch bereits in zwei Kilometern Tiefe wurde der Bohrer immer wieder stark seitlich abgelenkt oder verhakte sich. Als die Mannschaft frustriert das gesamte Bohrgestänge wieder herausholte, fand es an der Krone die Reste von frischem Magma, das bei rund 1000 Grad Celsius mit dem Bohrgerät in Kontakt gekommen war. Damit war es dort selbst für die moderne Technik viel zu heiß. Noch ist unklar, ob sich überkritisches Wasser aus Bohrlöchern in Vulkanzonen wirklich nutzen lässt.

In Mitteleuropa wären so hohe Temperaturen erst in Tiefen von weit über zehn Kilometern anzutreffen. Auf diese Distanz werden Bohrungen extrem teuer; auch würde das Wasser auf dem Weg nach oben zu stark erkalten. Doch könnte man statt Wasser einfach eine andere Flüssigkeit ins Bohrloch drücken. Der US-Forscher Donald Brown vom Forschungszentrum Los Alamos schlug dafür Kohlendioxid vor:

Erdwärme aus dem Vorgarten

Schon ein Dutzend Meter unter dem Rasen liegt die Erdtemperatur, unabhängig von Sommer und Winter, etwa bei konstant 10 Grad Celsius. Das genügt, um – unterstützt durch eine Wärmepumpe – Häuser in der kalten Jahreszeit zu beheizen, was immerhin mehr als die Hälfte des Energieverbrauchs deutscher Haushalte ausmacht. Der Markt für oberflächennahe Erdwärmeheizungen erlebte deshalb in den letzten Jahren zweistellige Wachstumszahlen. Schweden fördert auf diese Weise bereits mehr Wärme aus dem Boden als Island. Auch in Deutschland wurden schon über 265 000 Löcher gebohrt. Ein Fünftel aller Neubauten nutzt hier zu Lande gegenwärtig diese Technik.

Eigentlich handelt es sich bei dieser oberflächennahen Geothermie um Solarenergie: In den angebohrten Tiefen von 50 bis 250 Metern speichert der Boden überwiegend Sonnenstrahlung und lauwarmes einsickerndes Regenwasser. Ein typisches Bohrloch hat einen Durchmesser von 15 Zentimetern und kann in einigen Stunden fertiggestellt werden. Der Bohrmeister zwängt dann zwei Kunststoffschläuche hindurch und verfüllt den verbliebenen Hohlraum mit einem Zementgemisch. Schon kann Wasser durch den geschlossenen Kreislauf dieser Erdwärmesonde strömen. Es zieht thermische Energie aus dem Untergrund und überträgt sie in den Heizungskeller. Den Rest übernimmt dort die Wärmepumpe. Sie funktioniert wie ein Kühlschrank, aber mit umgekehrtem Kreisprozess. Zwar verbraucht die Pumpe dabei auch Strom, dennoch stammen gut 80 Prozent der genutzten Heizenergie aus dem Boden.

Erfolgreich ist die Technik vor allem, weil sie universell einsetzbar ist. Nur in wenigen Gebieten ist sie nicht erlaubt, etwa bei empfindlichen und damit schützenswerten Grundwasserschichten in der Tiefe. In seltenen Fällen birgt der Untergrund auch Tücken: Am Rathaus von Staufen im Breisgau sollte ein Feld aus sieben Erdwärmesonden für saubere Heizwärme sorgen. Eine davon verband daraufhin eine Grundwasserschicht mit einem bis dahin trockenen Sedimentgestein, das die chemische Verbindung Anhydrit enthält. Dieses Mineral begann durch Wasserzutritt zu Gips zu reagieren. Dabei wuchs sein Volumen um 60 Prozent – was einen Teil der historischen Altstadt des idyllischen Städtchens um über 30 Zentimeter anhob und dort viele Gebäude beschädigte.

In Ballungsräumen lässt sich die oberflächennahe Geothermie großflächig nutzen. So werden in Frankfurt am Main bereits ganze Felder aus Erdwärmesonden eingesetzt, um im Sommer Hochhäuser zu kühlen. Dazu wird der Kreisprozess der Pumpe kurzerhand umgedreht und die Wärme aus dem Gebäude in die Tiefe abgeführt. Als Folge erhitzt sich das Gestein unter der Stadt im Sommer auf über 20 Grad Celsius. Ein Teil der Wärme bleibt immerhin lange genug gespeichert, um im Winter wiederverwendet zu werden. Auch andere unterirdische Wärmequellen der Großstädte ließen sich so anzapfen, was eine internationale Studie am Beispiel von Köln zeigte: Rein rechnerisch ließe sich die ganze Stadt demnach aus ihrer eigenen Abwärme in der Tiefe beheizen. ***Karl Urban***

MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de

Unser Online-Dossier »Energie«
finden Sie unter

www.**spektrum.de**/energie

Das Gas wird schon bei moderaten 31 Grad Celsius und einem vergleichsweise geringen Druck überkritisch. In die Tiefe gepumpt, würde ein Teil davon erhitzt werden und dann über ein zweites Bohrloch wieder aufsteigen. An der Oberfläche könnte es direkt eine Turbine antreiben. Würde man dafür verflüssigte Abgase eines fossilen Kraftwerks verwenden, ließen sich die Verlustanteile des Treibhausgases sogar in der Tiefe endlagern. Wenn die Technik denn mal funktioniert: Denn bisher haben Forscher die Interaktionen von CO_2 und Wasser in der Tiefe nicht hinreichend verstanden. Außerdem besitzt Kohlendioxid eine deutlich geringere Wärmekapazität, so dass ein solches Geothermiekraftwerk nur unwesentlich mehr Strom liefern würde als eine konventionelle Anlage auf Wasserbasis.

Vulkane am Meeresgrund als Energiequelle?

In noch fernerer Zukunft ließe sich eine Idee mexikanischer Ingenieure realisieren: Ein Team um Gerardo Hiriart von der Nationalen Autonomen Universität in Mexiko-Stadt (Unam) will Spaltenvulkane im Pazifik erschließen. Entlang der Mittelozeanischen Rücken schießt aus der Tiefe heißer Dampf unter hohem Druck hervor, an machen Stellen sogar in überkritischem Zustand. Die Forscher schlagen vor, große Trichter über diese so genannten schwarzen Raucher zu stülpen, um aus dem ständig emporquellenden Dampf über der Wasseroberfläche auf Plattformen mit Turbinen Strom zu gewinnen. Selbst wenn das gelänge, dürften nur solche Staaten von der Technik profitieren, die wie Mexiko Zugang zu küstennahen Meeresvulkanen besitzen.

Weltweit liegt das größte Potenzial jedoch weiterhin wie hier zu Lande in heißen Gesteinszonen mehrere Kilometer unter der Erdoberfläche. Hierhin vorzudringen wäre für eine zukünftige Energieversorgung aus überwiegend erneuerbaren Quellen dringend vonnöten: Denn überall dort, wo Windkraftanlagen und Fotovoltaik massenhaft fossile und atomare Kraftwerke ersetzen, werden die Stromnetze durch die stark schwankende Einspeisung schnell überfordert. Dagegen können Geothermiekraftwerke schon heute über 75 Prozent des Jahres laufen, mit steigender Tendenz.

Damit ist die Erdwärme die stetigste unter den erneuerbaren Energieform. Sie müsste allerdings deutlich schneller wachsen, um diesen Vorteil wirklich ausspielen zu können. Zu beobachten ist dieser Trend derzeit immerhin ansatzweise: Ein Bericht des IPCC prognostizierte anhand laufender Bauvorhaben vieler Staaten, dass die weltweit installierte geothermische Leistung in den nächsten drei Jahren fast doppelt so schnell zunimmt wie in den letzten drei Jahrzehnten. Mittelfristig könnte der Erfahrungsschatz dann ausreichen, mit der EGS-Technik auch sehr viel mehr heiße Gesteinsschichten zu erschließen. Im besten Fall würden so bis zum Jahr 2050 drei Prozent des globalen Strombedarfs gedeckt werden. Noch mehr könnte die Erdwärme beim Beheizen und Kühlen von Gebäuden beitragen, unterstützt von oberflächennahen Bohrungen (siehe Kasten links). Dafür wird sogar ein Anteil von fünf Prozent prognostiziert.

Die Zahlen machen jedoch deutlich, dass Geothermie für die Stromversorgung fernab vulkanischer Zonen ein Randphänomen bleiben wird. Auch sind die Vorhersagen für den künftigen Ausbau längst nicht so zuverlässig wie bei anderen erneuerbaren Energien. Denn bisher stieß noch jede kilometertiefe Bohrung auf geologische Eigenheiten der örtlichen Erdkruste, mit der sich Ingenieure und Geologen auseinandersetzen mussten. Selbst die kochenden Schlammtöpfe im isländischen Krýsuík sorgten für Überraschungen: Bis 1999 versorgte hier ein kleines Heizkraftwerk zwei nahe gelegene Orte mit Energie. Eines Tages riss eine Dampfexplosionen das unzulänglich gesicherte Bohrloch kurzerhand in Stücke. Die Behörden setzten von da an auf Tourismus und bauten dort einen Holzsteg und ein öffentliches WC. Nach einer weiteren Explosion blieb nur der Steg übrig. Und das Schild mit den drei mahnenden Worten: »Achtung: Geothermiegebiet – Explosionsgefahr.« ~

DER AUTOR

Karl Urban studierte Geowissenschaften in Tübingen und Reykjavík. Er arbeitet als freier Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

QUELLEN

Brown, D.: A Hot Dry Rock Geothermal Energy Concept Utilizing Supercritical CO_2 Instead of Water, Proceedings Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford 2000

Büro für Technikfolgenabschätzung im Deutschen Bundestag: Möglichkeiten geothermischer Stromerzeugung in Deutschland, 2003

Edenhofer, O. et al.: Intergovernmental Panel on Climate Change: Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, 2012. http://srren.ipcc-wg3.de/

Hiriart, G. et al.: Submarine Geothermics; Hydrothermal Vents and Electricity Generation, Proceedings World Geothermal Congress, Bali 2010

Kock, N., Kaltschmitt, M.: Effizientere Ressourcenausnutzung geothermischer Anlagen – technische Möglichkeiten und deren Bewertung. In: Zeitschrift für Energiewirtschaft 4, S. 275–286, 2011

Lund, J.: 100 Years of Geothermal Power Production, GHC Bulletin, 2004

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1157705**

Auf dem Weg zum künstlichen Gehirn

Ein ambitioniertes Projekt zielt darauf ab, in zehn Jahren das menschliche Gehirn vollständig zu simulieren. Es verspricht nicht nur eine Revolution in den Neurowissenschaften, sondern auch grundlegende neue Erkenntnisse für die Computertechnik.

Von Henry Markram

Es wird Zeit für einen neuen Ansatz bei der Erforschung des menschlichen Gehirns. Bisher haben Wissenschaftler die einzelnen Teile unseres Denkorgans – von Neurotransmittern über neuronale Schaltkreise bis hin zu den übergeordneten Arealen für bestimmte Funktionen – gesondert untersucht. Dieser reduktionistischen Methode sind bedeutende Erkenntnisse zu verdanken. Mittlerweile stößt sie jedoch an ihre Grenzen. Sie taugt einfach nicht dazu, die Funktionsweise jener informationsverarbeitenden Maschine in unserem Kopf, die vielleicht das komplexeste System im Universum ist, in ihrer Gesamtheit zu erfassen. Dafür muss zum Reduzieren das Konstruieren, zum Zerlegen das Zusammenbauen kommen. Gefragt ist also ein neues Paradigma, das Analyse und Synthese in sich vereint. Schon der Urvater des Reduktionismus, der französische Philosoph René Descartes schrieb, man müsse die Teile untersuchen und sie dann zusammenfügen, um das Ganze neu zu erschaffen.

Genau darum geht es beim Human Brain Project (kurz HBP), an dem sich 130 Universitäten in aller Welt beteiligen: Wir wollen ein vollständiges menschliches Gehirn simulieren. Das Vorhaben konkurriert mit aktuell noch fünf anderen im Rahmen der Flaggschiffinitiative der Europäischen Union um ein Preisgeld von einer Milliarde Euro, das den beiden Gewinnern des Wettbewerbs ab 2013, verteilt über zehn Jahre, zur Verfügung stehen wird (siehe Kasten auf S. 88).

Wenn das ambitionierte Vorhaben gelingt, verfügen wir am Ende über ein Forschungsinstrument, zu dem bisher nichts Vergleichbares existiert. Stellen Sie es sich als den leistungsfähigsten Flugsimulator aller Zeiten vor, nur dass man damit nicht durch imaginäre Lüfte fliegt, sondern im Detail nachvollzieht, was beim Denken und Empfinden in unserem Kopf vorgeht. Dieses »virtuelle Gehirn« – ein Programm, das auf Supercomputern läuft – wird in Aufbau und Funktion sämtliche relevanten Informationen beinhalten, die Generationen von Neurowissenschaftler bis heute zusammengetragen haben.

Forscher überall auf der Welt sollen es nutzen können, indem sie Rechenzeit für eigene Experimente reservieren –

Im Rahmen des Projekts Blue Brain gelang der Gruppe des Autors bereits die Simulation einer 10 000 Neurone umfassenden kortikalen Säule, der Grundeinheit für die Informationsverarbeitung in der Hirnrinde. Die Farben zeigen jeweils die momentane Membranspannung an. Experimentell lässt sich die Gesamtaktivität einer so großen Hirnregion bis hinab zu den einzelnen Nervenzellen nicht ermitteln.

AUF EINEN BLICK

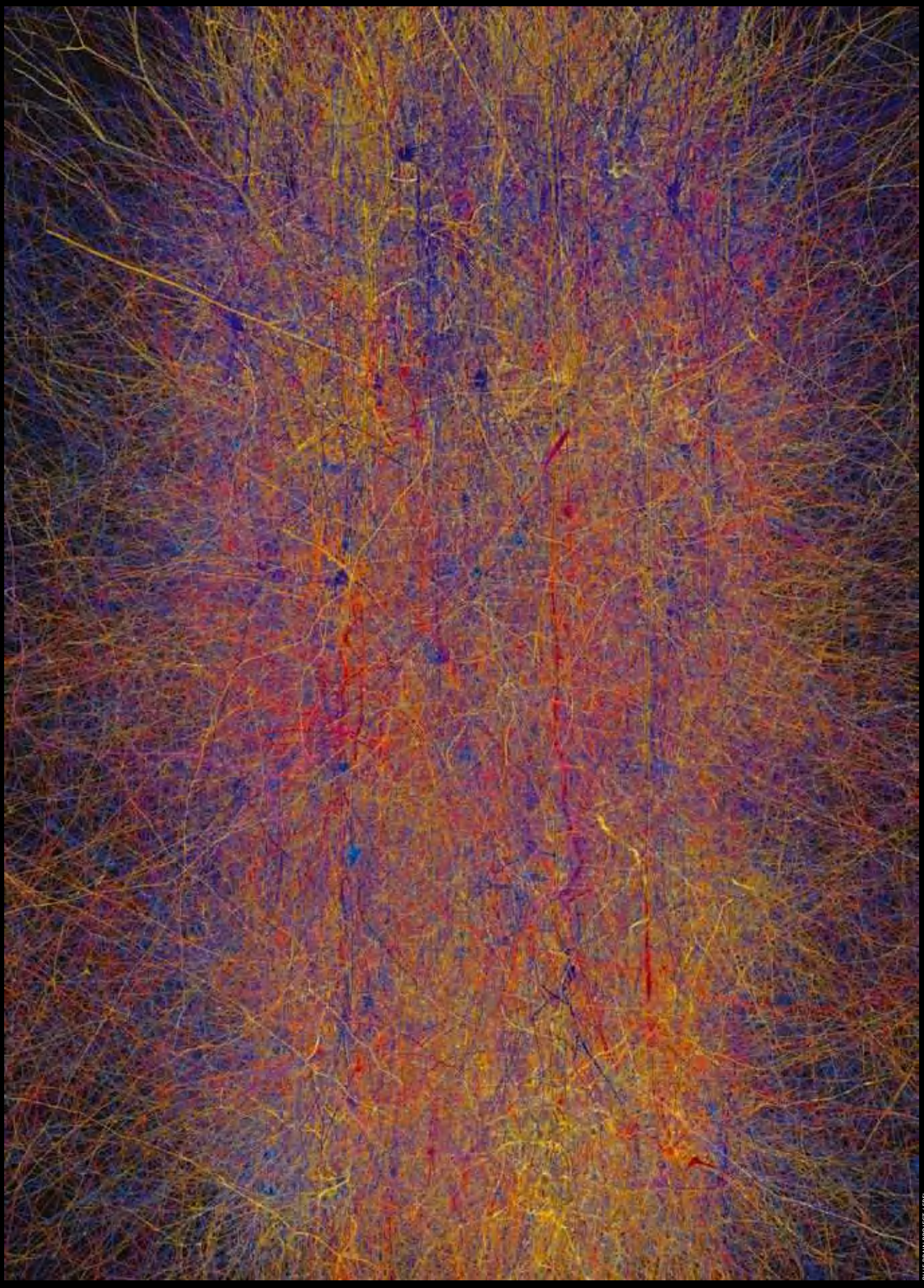
DAS DENKORGAN ALS COMPUTERMODELL

1 Anhand von Computermodellen lassen sich bereits einzelne **Hirnfunktionen** digital abbilden. So hat die Forschungsgruppe des Autors im Rahmen des Projekts **Blue Brain** die Arbeitsweise einer **kortikalen Säule** simuliert.

2 Bis zum Ende des Jahrzehnts werden Rechner so leistungsfähig sein, dass sie **das gesamte menschliche Gehirn virtuell nachbilden** können, indem sie sämtliche Abläufe darin von der Ebene des einzelnen Neurons bis zum gesamten Organ nachvollziehen.

3 Ziel des Human Brain Projects ist es, ein solches simuliertes Gehirn zu schaffen. Es würde einzigartige Einblicke in die Grundlagen unserer **kognitiven Fähigkeiten** erlauben und der Entwicklung **künstlicher Intelligenz** neue Impulse verleihen.

4 Ein virtuelles Gehirn könnte aber auch in der medizinischen Forschung als Ersatz für das echte Organ dienen und so etwa neue Erkenntnisse über die **Ursachen psychischer Störungen** wie des Autismus liefern oder die risikolose **Prüfung neuer Psychopharmaka** »in silico« ermöglichen.



BLUE BRAIN PROJECT / EPFL

BLUE BRAIN PROJECT / EPFL

Die Simulation der kortikalen Säule erlaubt es, in das Nervennetz hineinzuzoomen. Auf dem hier gezeigten Ausschnitt sind unterschiedlich eingefärbte Pyramidenzellen mit ihren jeweiligen Fortsätzen zu sehen.

ähnlich, wie Astronomen Beobachtungszeit auf großen Teleskopen buchen. Das gibt ihnen die Möglichkeit, Hypothesen über die Funktionsweise des gesunden wie auch des kranken Gehirns zu prüfen, bessere Diagnosemethoden für seelische Leiden wie Autismus und Schizophrenie auszuarbeiten oder neue Therapieansätze für Erkrankungen wie Depression und Alzheimerdemenz zu entwickeln. Die emulierten Schaltpläne für einige zehn Billionen neuronaler Verknüpfungen dürften aber auch wertvolle Hinweise zur Konstruktion von hirnähnlichen Computern und intelligenten Robotern geben. Von der virtuellen Nachbildung des Gehirns werden also Neurowissenschaften, Medizin und Informationstechnologie gleichermaßen profitieren.

Eine erste Version könnte schon Ende dieses Jahrzehnts lauffähig sein; bis dahin wird jedenfalls die benötigte Rechenleistung zur Verfügung stehen. Das Modell würde dann eine Plattform bieten, in die sich alles vorliegende Wissen integrieren lässt. Dabei sollte es bereits wertvolle Erkenntnisse liefern, bevor es sämtliche Hirnfunktionen exakt nachbildet. So wird es Vorhersagen über unbekannte Aspekte ermöglichen und dadurch helfen, künftige Experimente gezielter zu planen und fruchtlose Bemühungen zu vermeiden. Neu gewonnenes Wissen lässt sich mit Bekanntem verknüpfen, so dass sich die Lücken im Modell Stück für Stück mit immer realistischeren Details füllen werden – bis schließlich ein vollständiges, funktionsfähiges Gegenstück des Gehirns existiert, das dem Vorbild von der Gesamtarchitektur bis hin zu den molekularen Details exakt entspricht.

Beweggründe für die Modellierung des Gehirns

Ein Hirnsimulator wird vor allem aus zwei Gründen dringend benötigt. Der eine ist, dass allein in Europa 180 Millionen Menschen – etwa ein Drittel der Bevölkerung – an Erkrankungen des Gehirns leiden. Diese Zahl wird mit der stetig steigenden Lebenserwartung, die das Durchschnittsalter der Bevölkerung anhebt, weiter wachsen, da die Demenzen als wichtigste Gruppe geistiger Störungen erst in höheren Jahren auftreten. Pharmaunternehmen investieren derzeit zu wenig in neue Therapien für Erkrankungen des Nervensystems, weil deren Ursachen meist nicht genau bekannt sind. Eine Gesamtsicht des Gehirns bietet die Chance, solche Krankheiten nach biologischen Kriterien neu zu beschreiben, statt sie nur als Konstellationen bestimmter Symptome zu betrachten. Diese Betrachtungsweise würde den Schritt hin zu selektiv wirksamen Therapien erleichtern, die bei den zu Grunde liegenden Störungen ansetzen.

Der zweite Beweggrund für das Projekt liegt darin, dass die Informatik in gewissem Sinn in einer Sackgasse steckt. Trotz unaufhörlich steigender Rechenleistung scheitern Computer immer noch an vielen Aufgaben, die selbst die Gehirne von nicht besonders hoch entwickelten Tieren mühelos bewältigen. Informatiker haben zwar große Fortschritte im Bereich der visuellen Mustererkennung erzielt. Dennoch sind Computer nach wie vor kaum in der Lage, den Kontext einer Szene für die Deutung heranzuziehen oder zufällige Informationshappen zur Vorhersage künftiger Ereignisse zu verwenden – was zum Alltagsgeschäft des Gehirns zählt.

Da leistungsfähigere Computer auch mehr Energie benötigen, wird ihr Strombedarf eines nicht allzu fernen Tages nicht mehr zu decken sein. Die Rechengeschwindigkeit heutiger Supercomputer bemisst sich in Petaflops – einer Billiarde einfacher Berechnungen (Gleitkommaoperationen) pro Sekunde. Die nächste Generation, die um 2020 zu erwarten ist, dürfte 1000-mal so schnell arbeiten. Ihre Rechenleistung bewegt sich dann im Bereich von Exaflops – Trillionen Rechenschritten pro Sekunde. Ein solcher Computer wird etwa 20 Megawatt Strom verbrauchen, was dem Energiebedarf einer Kleinstadt im Winter entspricht. Um Rechner zu bauen, die einige der Dinge, die das menschliche Gehirn vermag, ohne exorbitanten Energieverbrauch zu Stande bringen, bedarf es also grundsätzlich neuer Strategien.

Es ist sicher nicht das Schlechteste, sich bei der Suche danach vom menschlichen Gehirn inspirieren zu lassen, das für seine vielfältigen Intelligenzleistungen nur rund 20 Watt verbraucht – etwa so viel wie eine schwache Glühbirne oder

ein Millionstel des Energiebedarfs eines Exaflop-Computers. Um zu erkennen, wie unser Denkapparat das schafft, müssen wir seine Organisation auf zahlreichen Komplexitätsstufen verstehen, von den Genen bis zur Ebene des bewussten Denkens. Vieles ist schon bekannt, und es gilt nur noch, die vorhandenen Informationen zu einem Gesamtbild zu verschmelzen. Das Gehirnmodell soll dies ermöglichen.

Kritiker bezweifeln, dass sich das menschliche Gehirn vollständig simulieren lässt. Einer ihrer wichtigsten Einwände lautet: Es ist unmöglich, sämtliche Verbindungen seiner rund 100 Billionen Synapsen virtuell zu repräsentieren, weil man sie überhaupt nicht alle erfassen kann. Das stimmt, und deshalb werden wir es auch gar nicht erst versuchen. Wir wollen die unzähligen Kontakte zwischen den Hirnzellen auf andere Weise reproduzieren. Der Trick besteht darin, das Konstruktionsprinzip des Gehirns nachzuahmen: die Regeln für seinen Aufbau, die sich während seiner Evolution herausgebildet haben und bei der Entwicklung eines jeden Fötus immer wieder befolgt werden. Ihre Kenntnis sollte theoretisch ausreichen, um mit der Simulation des Gehirns zu beginnen.

Die Komplexität, die aus diesen Regeln erwächst, ist zwar enorm, weshalb wir die schnellsten Supercomputer benötigen, um sie abzubilden. Die Regeln selbst zu enträtseln erscheint dagegen wesentlich leichter. Und wenn uns das gelingt, gibt es keinen vernünftigen Grund, weshalb wir sie nicht genauso anwenden können wie die Natur, um ein Gehirn »in silico« zu konstruieren.

Ich meine hier Regeln wie die, nach denen Gene aktiv werden und so dafür sorgen, dass verschiedene Typen von Hirnzellen entstehen, sich nach einem bestimmten Plan im Gehirn verteilen und Verbindung untereinander aufnehmen. Einige haben meine Kollegen und ich bereits entdeckt, als wir vor etwa 20 Jahren mit unseren grundlegenden Arbeiten zur Simulation von Hirnfunktionen begannen. Damals erstellten wir Steckbriefe einzelner Nervenzellen. Wir sammelten große Mengen an Daten über die geometrischen Merkmale verschiedener Neuronentypen und schufen für Hunderte davon digitale dreidimensionale Rekonstruktionen. Mit der Patch-Clamp-Technik, bei der die Spitze einer mikroskopisch feinen Glaspipette auf die Oberfläche einer Zelle aufgesetzt wird, um die Ionenströme durch ihre Membrankanäle zu messen, gelang es uns zudem, die elektrischen Eigenschaften der jeweiligen Neurone zu erfassen.

Zur Simulation einer einzelnen Nervenzelle bedurfte es 2005 noch eines leistungsfähigen Computers und einer dreijährigen Doktorarbeit. Doch schon damals zeichnete sich ab, dass bald anspruchsvollere Projekte realisierbar wären. Wir sahen die Chance, auch größere Ausschnitte aus dem Schaltplan des Gehirns modellieren zu können, selbst wenn wir ihre Eigenschaften noch nicht vollständig kannten. Am Brain and Mind Institute der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne starteten wir daher eines der Vorgängerprojekte des HBP: das Blue Brain Project. Wir wollten »integrative Computermodelle« entwickeln, die alle verfügbaren Daten und Hypothesen zu einem bestimmten neuronalen Netzwerk enthalten, mögliche Widersprüche zwischen ihnen auflösen und Hinweise geben, wo noch wichtige Informationen fehlen.

Simulation einer kortikalen Säule

Als Pilotprojekt konstruierten wir das Modell einer Hirnstruktur, die als kortikale Säule bezeichnet wird und ein äußerst kompaktes Netzwerk aus einigen zehntausend Neuronen darstellt. Würde man mit einem feinen Hohlbohrer einen Gewebszylinder von einem halben Millimeter Durchmesser und 1,5 Millimeter Höhe aus der Hirnrinde entnehmen, wäre dies eine solche Säule.

Es handelt sich um eine höchst effektive informationsverarbeitende Einheit. Deshalb wurde sie nach ihrer Erfindung im Verlauf der Evolution wieder und wieder kopiert – bis die Hirnrinde ganz damit bedeckt war und sich zur Vergrößerung ihrer Oberfläche in Falten legen musste, damit noch mehr solche Einheiten Platz fanden. Die Säule durchmisst alle sechs Schichten des Neokortex, des äußersten Bereichs der Hirnrinde. Ihre neuronalen Verbindungen zum Rest des Gehirns differieren stark zwischen den einzelnen Lagen. Die

BLUE BRAIN PROJECT / EPFL

Selbst Details einzelner Nervenzellen lassen sich im Computermodell darstellen. Als helle Knöpfe erscheinen hier die Dornfortsätze (spines) auf den Dendriten. Sie bilden Synapsen, die Kontaktstellen zu vorgeschalteten Neuronen.

Organisation dieser Verbindungen ähnelt der Art, wie eine Telefonleitung anhand der Vorwahl über Vermittlungsstationen an den Gesprächspartner aufgebaut wird.

Jede kortikale Säule enthält einige hundert verschiedene Neuronentypen. In unser Modell, das auf einem IBM Blue Gene Supercomputer lief, bauten wir alle verfügbaren Informationen über deren Verteilung in sämtlichen Schichten ein, bis wir das »Rezept« für eine kortikale Säule in einer neugeborenen Ratte erstellt hatten. Wir instruierten den Rechner auch, die virtuellen Neurone miteinander zu verbinden – allerdings nur in der Weise und dem Umfang, wie das echte Nervenzellen im Hirngewebe tun.

Wir brauchten drei Jahre, um die Software für das erste Modell einer kortikalen Säule zu entwickeln. Doch am Ende waren wir in der Lage, diese funktionelle Einheit des Gehirns originalgetreu zu simulieren: Ihr virtuelles Gegenstück reproduzierte alles, was über sie bekannt ist. Damit hatten wir zugleich den Beweis erbracht, dass unser Konzept der »Synthesebiologie« funktioniert und völlig neue Forschungsansätze ermöglicht.

Noch handelte es sich um ein statisches Modell, das einem Teil des Gehirns im komatösen Zustand entsprach. Eigentlich wollten wir jedoch wissen, ob es auf einen äußeren Reiz wie eine echte kortikale Säule reagieren würde – wenngleich eine, die vom Rest des Gehirns getrennt ist. Also stimulierten wir 2008 unser virtuelles Hirnstückchen mit einem simulierten elektrischen Impuls.

Das Ergebnis war faszinierend: Wir konnten beobachten, wie die Neurone begannen, sich miteinander zu unterhalten. Spannungspulse oder »Spikes« analog zu den Aktionspotenzialen, welche die Laute in der Sprache des Gehirns bilden, breiteten sich über die virtuelle Säule hinweg aus und erfassten das gesamte Netzwerk. Sie bewegten sich zwischen den Schichten auf und ab, oszillierten hin und zurück, wie man das auch an lebenden Hirnschnitten beobachten kann. Dieses Verhalten hatten wir nicht in das Modell einprogrammiert; es ergab sich spontan aus der Architektur des Netzwerks und blieb auch nach dem Ende der Stimulation noch kurze Zeit erhalten – als Beweis für die innere Eigendynamik, welche die Säule entfaltete, während sie den Reiz verarbeitete.

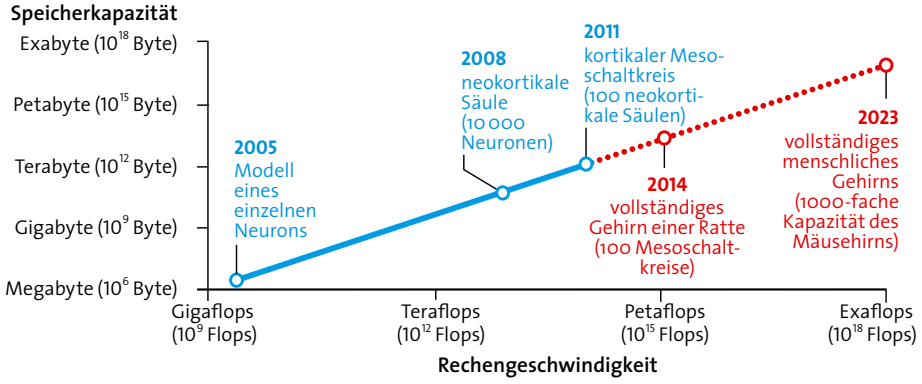
Wie das Simulationsprogramm funktioniert

Seitdem haben wir unser integratives Modell stetig verfeinert, indem wir es mit neuen Erkenntnissen von Labors aus aller Welt fütterten. Auch unsere Software entwickeln wir kontinuierlich weiter, so dass wir jede Woche, wenn wir die Simulation neu starten, mit mehr Daten und Regeln arbeiten und so der Realität noch ein Stückchen näher kommen. Im Moment sind wir dabei, das Modell auf eine größere Hirnregion auszudehnen. Danach wollen wir es auf ein komplettes Gehirn erweitern – zunächst einmal das einer Ratte.

Die Aufgabe ist gigantisch. Es gilt nicht nur, enorme Mengen an Daten und Informationen von Forschern weltweit auf einheitliche Weise zusammenzuführen und auf Muster oder Regeln zu durchsuchen, welche die Organisation des Gehirns

Mehr Gehirn durch leistungsfähigere Computer

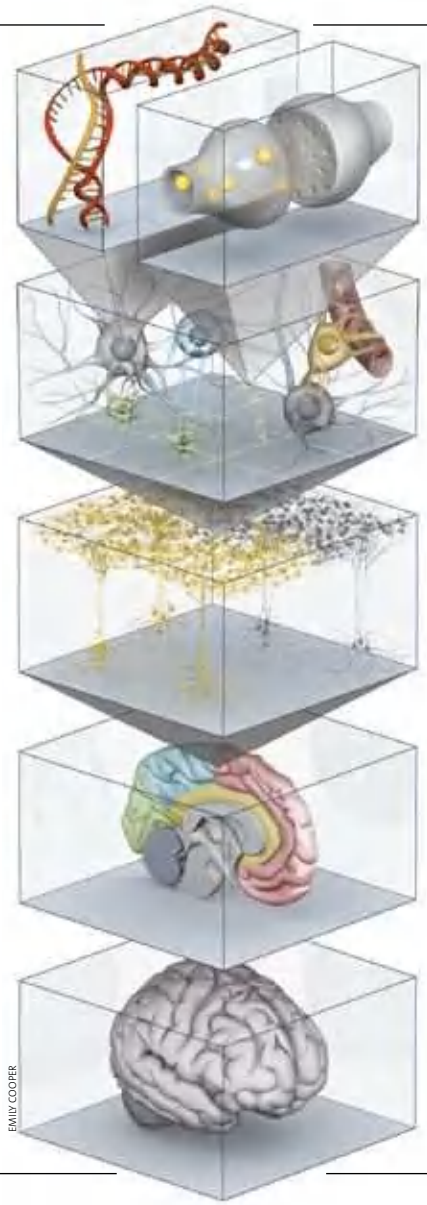
Die Chancen für den Aufbau eines virtuellen Gehirns, das detailliert genug für wichtige wissenschaftliche Untersuchungen ist, steigen mit der Rechengeschwindigkeit der verfügbaren Computer. Im Jahr 2008 gelang es, ein digitales Pendant eines zylindrischen Gewebestücks aus der Hirnrinde der Ratte zu erstellen, einer so genannten kortikalen Säule. Damals lag die Rechenleistung im Bereich von Teraflops (Billionen elementaren Rechenoperationen pro Sekunde). Mit dem Vorstoß der Supercomputer in den Petaflop- und schließlich Exaflop-Bereich wollen die Protagonisten des Human Brain Project komplette Simulationen des Gehirns von Ratten und später auch des Menschen erstellen.



NACH: BLUE BRAIN PROJECT / EPFL

Nachbau des Gehirns

Ziel des Human Brain Project ist eine Computersimulation der rund 100 Milliarden Neurone in unserem Kopf und ihrer 100 Billionen Verbindungen. Dafür bewerben sich die verantwortlichen Wissenschaftler um Fördermittel in Höhe von einer Milliarde Euro bei der Europäischen Union. Das Computermodell würde die Hirnfunktion auf sämtlichen Stufen der Informationsverarbeitung nachvollziehen, von der chemischen und elektrophysiologischen Signalgebung bis hin zu kognitiven Leistungen, die intelligentem Verhalten zu Grunde liegen.



EMILY COOPER

Molekulare Ebene

Die Erkenntnisse aus einem Jahrhundert neurologischer Forschung seit der ersten Untersuchung einer Hirnzelle unter dem Mikroskop fließen in das digitale Abbild dieser Zelle ein. Sie verfügt über die molekularen Bestandteile, um alle wesentlichen Merkmale eines Neurons realitätsnah zu simulieren. Dazu gehört insbesondere die Übertragung elektrischer und chemischer Signale.

Zelluläre Ebene

Auch die äußere Gestalt der Neurone und nichtneuronalen Gliazellen mit ihren Axonen und Dendriten, die Signale empfangen und aussenden, werden exakt nachgeahmt.

Neuronale Schaltkreise

Ferner bildet das Hirnmodell die Vernetzung der Neurone mit ihren Nachbarzellen und zwischen verschiedenen Hirnregionen nach, um Hinweise auf die Ursachen komplexer psychischer Erkrankungen wie Autismus oder Schizophrenie zu geben.

Hirnregionen

Bedeutende Untereinheiten des Gehirns wie der für Gefühle zuständige Mandelkern, der Hippocampus als Tor zum Gedächtnis oder das unser Verhalten steuernde Frontalhirn lassen sich isoliert oder in Interaktion mit anderen Regionen untersuchen.

Gesamtes Organ

Ein virtuelles Gehirn soll das echte Organ für Forschungszwecke ersetzen. Zum Beispiel böte es die Möglichkeit, die Auswirkungen einer Mutation zu untersuchen, indem man ein bestimmtes Gen durch Löschen des betreffenden Computerkodes ausschaltet, was Wissenschaftler heute mit gezielt eingeführten Mutationen im Tierexperiment tun. Dabei entfiele nicht nur die langwierige Züchtung, sondern es ließen sich auch beliebig viele Versuchsbedingungen simulieren.

bestimmen. Anschließend müssen wir auch die dahintersteckenden biologischen Vorgänge in mathematische Gleichungen übersetzen und parallel dazu Programme entwickeln, die es erlauben, diese Gleichungen auf Supercomputern zu lösen. Dabei ist darauf zu achten, dass die Software insgesamt ein virtuelles Gehirn erzeugt, das die zu Grunde liegende Biologie getreu widerspiegelt. Wir nennen unser Programmpaket deshalb auch halb ehrfürchtig und halb spöttisch unseren Brain Builder, also Hirnbaumeister

Die Hypothesen über die Arbeitsweise des Gehirns, die wir so gewinnen und stetig verfeinern, ermöglichen schnellere Fortschritte beim Verständnis kognitiver Funktionen. Statt jede Einzelheit durch Messungen zu untersuchen, können wir anhand neu entdeckter Regeln konkrete Vorhersagen machen und sie gezielt im realen Experiment überprüfen. Aktuell geht es uns unter anderem darum, aus Informationen über Gene, die für charakteristische Proteine in bestimmten Neuronentypen kodieren, die Struktur und Funktion dieser Nervenzellen abzuleiten. Den Zusammenhang zwischen einzelnen Genen und kompletten Neuronen bezeichnen wir als »informatische Brücke«. Sie stellt eine Abkürzung dar, die uns die Synthesebiologie bietet.

Eine andere solche informatische Brücke, die Wissenschaftler schon seit Langem nutzen, ist der Zusammenhang zwischen Mutationen und Krankheiten. Mutationen verändern die von den Nervenzellen hergestellten Proteine; das wiederum beeinflusst die Gestalt und die elektrischen Eigenschaften dieser Neurone sowie die Synapsen, die sie bilden, und die elektrische Aktivität, die in lokalen Mikroschaltkreisen auftritt, bevor sie sich wellenartig über ganze Hirnregionen ausbreitet.

Hier zeigt sich, welche Möglichkeiten unser Modell eröffnet. Wir könnten zum Beispiel eine bestimmte Mutation einprogrammieren und dann verfolgen, wie sie sich auf jeder einzelnen Ebene der biologischen Kausalkette auswirkt. Wenn das entstehende Symptombild dem in der Realität beobachteten entspricht, bekommt diese virtuelle Kette von Ereignissen den Status eines hypothetischen Krankheitsme-

chanismus, und wir können nach möglichen Ansatzpunkten für Therapien suchen.

Dabei besteht unsere Vorgehensweise in einer Abfolge von Schritten, die wir immer wieder durchlaufen. Zunächst programmieren wir ein Modell nach bestimmten biologischen Regeln, wobei wir alle relevanten Daten einfließen lassen, die wir finden können. Dann starten wir die Simulation und vergleichen das Ergebnis – also das Verhalten der Proteine, Zellen und Teilnetzwerke – mit passenden experimentellen Befunden. Falls keine Übereinstimmung besteht, prüfen wir zunächst, ob die eingegebenen Daten stimmen, verfeinern die biologischen Regeln und lassen die Simulation erneut laufen. Diesen Zyklus wiederholen wir, bis das Modell die experimentellen Befunde zufriedenstellend reproduziert. Dann erweitern wir es auf eine größere Hirnregion und importieren dazu weitere Daten. Mit zunehmender Qualität der Software beschleunigt sich die Datenintegration und läuft schließlich automatisch ab, während sich das Verhalten des Modells der biologischen Realität immer weiter annähert. Damit scheint die Modellierung des gesamten Gehirns keine Utopie mehr, auch wenn wir noch nicht alles über die verschiedenen Nervenzellen und ihre Synapsen wissen.

Wichtigster Rohstoff: Daten und noch mehr Daten

Für unser Unterfangen benötigen wir Daten und zwar so viele wie möglich. Ethische Normen setzen Experimenten am menschlichen Gehirn zwar enge Grenzen. Doch ist es zum Glück nach ganz ähnlichen Regeln aufgebaut wie das anderer Säugetiere. Was wir über die genetische Basis des Säugerhirns wissen, stammt größtenteils von Experimenten mit Mäusen, während solche Versuche an Affen wertvolle Erkenntnisse über kognitive Vorgänge erbracht haben.

Wir können also mit einem Modell eines Nagerhirns beginnen und es als Ausgangsbasis für die Simulation unseres eigenen Denkorgans verwenden. Dazu müssen wir es nur entsprechend abwandeln und erweitern. Die Gehirnmodelle für Ratte und Mensch werden sich folglich parallel zueianander weiterentwickeln.

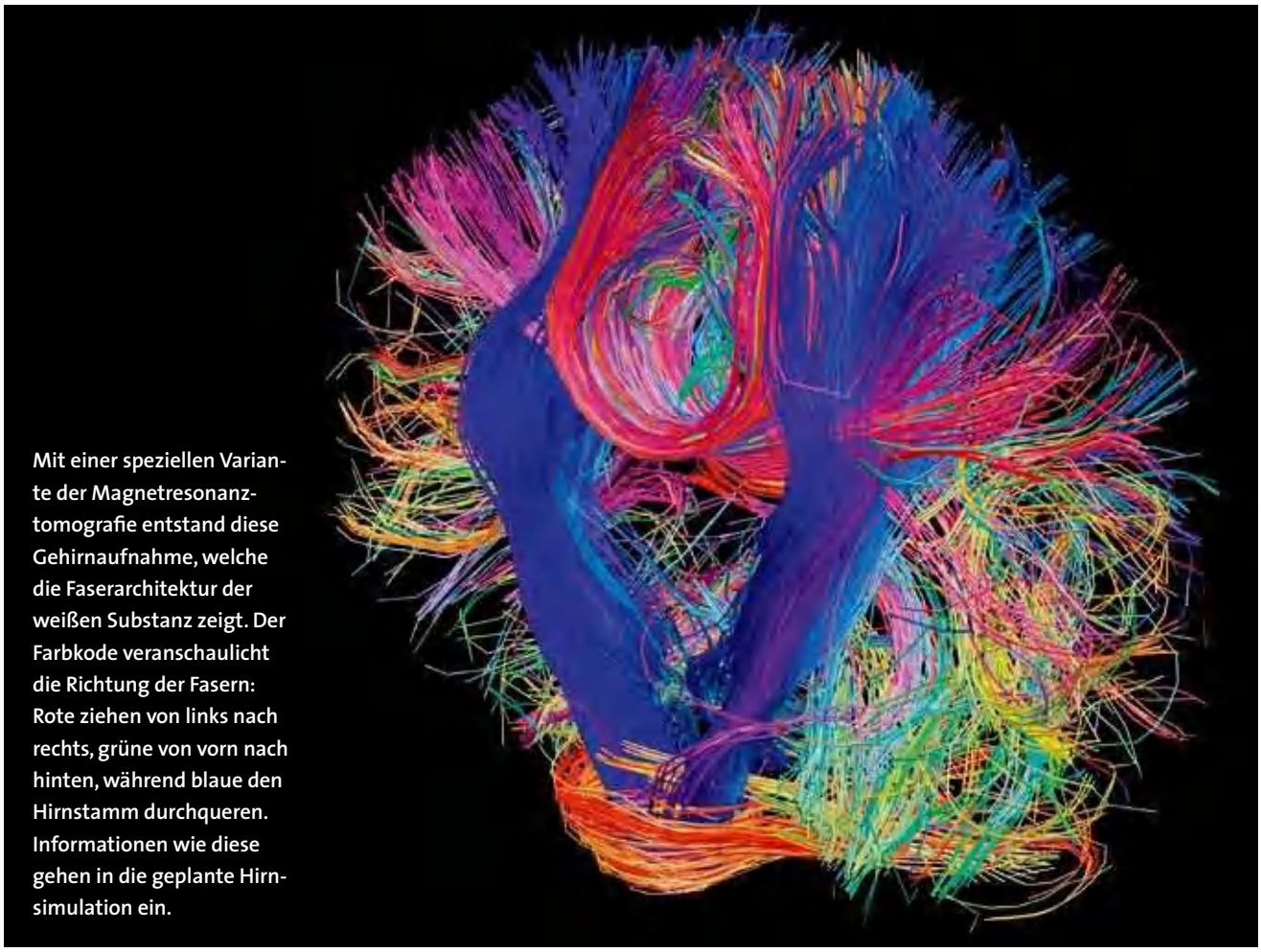
Daten aus neurowissenschaftlichen Untersuchungen helfen uns, nicht nur die Regeln für die Organisation des Gehirns zu erkennen, sondern auch zu überprüfen, ob unsere Schlussfolgerungen – die vorhergesagten Kausalketten – korrekt sind. Zum Beispiel weiß man, dass Säuglinge nur die Zahlen von 1 bis 3 als abstrakte Mengenangaben begreifen, höhere hingegen nicht. Wenn es also gelingt, das Gehirn eines Neugeborenen zu simulieren, müsste das Modell genau diese beschränkte Fähigkeit widerspiegeln.

Viele Daten, die wir benötigen, existieren bereits, sind jedoch schwer zugänglich. Sie zusammenzutragen und zu ordnen, gehört zu den größten Herausforderungen für das HBP. Von besonderem Interesse sind dabei auch Patientendaten – nicht nur, weil Fehlfunktionen Rückschlüsse auf den Normalzustand erlauben, sondern auch, weil wir mit unserem Modell nachvollziehen wollen, wie aus einem gesunden Gehirn ein krankes wird. Hirnscans von Patienten können daher eine wichtige Informationsquelle sein. Zu Millionen in den digitalen Archiven der Krankenhäuser weltweit abgelegt, werden sie bisher kaum für Forschungszwecke genutzt. Wenn es gelänge, sie alle mitsamt den zugehörigen Krankengeschichten sowie biochemischen und genetischen Informa-

Die europäische Flaggschiffinitiative

Das Human Brain Project bewirbt sich mit fünf anderen um einen der beiden Hauptpreise, welche die EU-Kommission im Rahmen ihrer so genannten Flaggschiffinitiative ausgelobt hat. Deren Zweck ist, visionäre Großprojekte in der Informations- und Kommunikationstechnologie (ICT) voranzubringen. Die zwei Sieger des Wettbewerbs erhalten eine Milliarde Euro an Fördergeldern, verteilt auf zehn Jahre. Die fünf anderen noch verbliebenen Projekte sind (siehe auch www.spektrum.de/flaggschiffe):

1. **Graphen (»Graphene«)**
   Ziel: die Erforschung der gesamten Bandbreite an technischen Anwendungsmöglichkeiten für nur eine Atomlage dicke Kohlenstofffolien
   Projektleiter: Jari Kinaret von der Chalmers-Universität in Göteborg
2. **Robotergefährten für jedermann (»Roboter Companions for Citizens«)**
   Ziel: empfindsame Roboter, die dem Menschen als intelligente Begleiter im Alltag zur Seite stehen
   Koordinator: Paolo Dario von der Scuola Superiore Sant'Anna in Pisa
3. **Der virtuelle Patient (»IT Future of Medicine«)**
   Ziel: Computermodelle für Kranke, an denen Ärzte die beste Behandlung erproben können
   Koordinator: Hans Lehrach vom Max-Planck-Institut für Molekulare Genetik in Berlin
4. **Der Echtzeit-Erdsimulator (»FutureICT«)**
   Ziel: Ein Weltmodell, das anhand von aktuellen Daten aus dem Web – etwa Beiträgen in sozialen Netzwerken – globale Entwicklungen vorhersagt
   Koordinator: Dirk Helbing vom Institut für Soziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich
5. **Der persönliche Schutzengel (»Guarding Angels«)**
   Ziel: ein autonomes intelligentes System, das den Menschen überallhin begleitet, seine Körperfunktionen überwacht, notfalls Hilfe anfordert und seinen Träger vor drohenden Gefahren warnt
   Projektleiter: Adrian Ionescu von der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne



Mit einer speziellen Variante der Magnetresonanztomografie entstand diese Gehirnaufnahme, welche die Faserarchitektur der weißen Substanz zeigt. Der Farbkode veranschaulicht die Richtung der Fasern: Rote ziehen von links nach rechts, grüne von vorn nach hinten, während blaue den Hirnstamm durchqueren. Informationen wie diese gehen in die geplante Hirnsimulation ein.

LABORATORY OF NEURO IMAGING AT UCLA LUND MARTINOS CENTER FOR BIOMEDICAL IMAGING AT MASSACHUSETTS GENERAL HOSPITAL; HUMAN CONNECTOME PROJECT FUNDED BY NIH

tionen in einer Datenbank online zugänglich zu machen, ließe sich dieser gewaltige Datenpool nach Mustern durchsuchen, die typisch für eine Krankheit sind.

Das Faszinierende an dieser Vorgehensweise beruht auf der Möglichkeit, Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen allen erfassten Erkrankungen mit mathematischen Mitteln zu identifizieren. Ein von zahlreichen Universitäten getragenes Projekt, die Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative, verfolgt bereits genau dieses Ziel: Es macht Hirnscans einer großen Zahl von Demenzpatienten und gesunden Vergleichspersonen zusammen mit den Ergebnissen von Liquor- und Blutuntersuchungen in einer Datenbank zugänglich.

Eine wichtige Frage ist schließlich die, ob denn genügend Rechenkapazität zur Verfügung steht. Das neueste Modell aus der Supercomputerreihe Blue Gene von IBM erreicht Geschwindigkeiten im Petaflop-Bereich und besteht aus annähernd 300 000 Prozessoren, die zusammen den Raum von 72 Kühlschränken einnehmen. Damit lässt sich ein Rattengehirn mit 200 Millionen Neuronen bis auf Zellniveau simulieren, nicht jedoch das des Menschen mit seinen gut 100 Milliarden Nervenzellen. Dazu bedarf es eines Computers, der Rechengeschwindigkeiten im Exaflop-Bereich erzielt. Eine Simulation auf molekularer Ebene wäre allerdings selbst dann noch unmöglich.

Weltweit arbeiten Ingenieurteams mit Hochdruck an der Entwicklung von Exaflop-Rechnern. Diese werden wohl wie frühere Generationen von Supercomputern für die Simulation physikalischer Prozesse, etwa aus der Kern- und Teilchenphysik, konfiguriert sein. Biologische Vorgänge nachzuahmen, stellt jedoch völlig andere Anforderungen an die Rechnerarchitektur.

Deshalb stimmt unser Konsortium aus hochrangigen Computerexperten gemeinsam mit Vertretern großer Hard- und Softwarefirmen sowie anderer Partner aus der Industrie eine solche Maschine speziell auf die Simulation von Gehirnfunktionen ab. Das Team entwickelt auch die Software, mit der wir Modelle erstellen können, die alle Auflösungsstufen von einer Gesamtansicht des Gehirns bis hinab zu einzelnen Zellen oder Molekülen umfassen, so dass der Betrachter nach Belieben hinein- und herauszoomen kann.

Sobald der Hirnsimulator gebaut ist, haben Forscher die Möglichkeit, Experimente in silico durchzuführen, ganz ähnlich wie sie das in vivo tun – nur sehr viel bequemer und mit weniger Einschränkungen. Wenn Wissenschaftler heute nach den Ursachen von Krankheiten suchen, indem sie ein bestimmtes Gen in Mäusen ausschalten, müssen sie die Tiere zunächst züchten. Das ist nicht nur zeitraubend, sondern auch keineswegs für jedes Gen möglich – so führen manche

Mutationen schon vor der Geburt zum Tod –, von den ethischen Bedenken gegen Tierversuche ganz abgesehen.

Im Simulator können die Forscher dagegen jedes beliebige virtuelle Gen ausschalten und die Auswirkungen sofort beobachten – noch dazu an menschlichen »Gehirnen« unterschiedlicher Altersstufen und Funktionszustände. Es ist kein Problem, ein Experiment im selben Modell unter variablen Bedingungen beliebig oft zu wiederholen. Eine solche Gründlichkeit wäre bei keinem Tierversuch erreichbar.

Das dürfte nicht nur die Suche nach möglichen Ansatzpunkten für Medikamente beschleunigen. Auch für die klinische Prüfung sollten sich ganz erhebliche Vorteile ergeben. So werden sich Patientengruppen genauer eingrenzen und unwirksame Substanzen oder solche mit inakzeptablen Nebenwirkungen früher herausfiltern lassen. Die Medikamentenentwicklung sollte dadurch an Effizienz gewinnen und nicht mehr bis zu ein Jahrzehnt dauern wie heute.

Vorbild für intelligente Computer

Die Erkenntnisse aus den Hirnsimulationen werden sich auch auf das Design von Computern auswirken. Denn durch sie erfahren wir, wie sich im Verlauf der Evolution ein System zur Informationsverarbeitung entwickelt hat, das störungsarm funktioniert, viele hochkomplexe Aufgaben rasch und simultan bewältigt, dabei nur so viel Energie verbraucht wie eine schwache Glühbirne und obendrein eine immense Speicherkapazität hat. Mit Hilfe von Verfahren, die bei den EU-Projekten BrainScaleS und SpiNNaker entwickelt wurden, werden wir auch Hirnschaltkreise auf Siliziumchips drucken. Aus solchen Chips sollen dann so genannte neuromorphe Computer entstehen (siehe den nachfolgenden Beitrag).

Den ersten vollständigen Hirnsimulationen, die wir auf unserem Computer implementieren, wird noch eines fehlen: Sie durchlaufen keine Entwicklung wie das reale menschliche Gehirn in der Kindheit. Von Geburt an gestaltet sich der Kortex durch Vermehrung, Wanderung und Ausmerzen von Neuronen um, während sich die Verknüpfungen zwischen den Nervenzellen ändern – eine Plastizität, die wesentlich von Erfahrungen beeinflusst wird. Unsere Modelle hingegen überspringen Jahre der Entwicklung, setzen erst in einem bestimmten Alter an und beginnen dann Erfahrungen zu sammeln. Dazu müssen wir sie so konstruieren, dass sie sich unter dem Einfluss äußerer Faktoren verändern.

Die Nagelprobe für das virtuelle Gehirn wird kommen, wenn wir es mit einem virtuellen Körper verbinden und mit einer realitätsnahen virtuellen Umgebung interagieren lassen. Das Modell vermag dann Informationen aus seinem Umfeld aufzunehmen und auf sie zu reagieren. Erst in diesem Stadium können wir es mit Wissen füttern oder ihm Fertigkeiten beibringen und sehen, ob es Anzeichen echter Intelligenz entwickelt. Dann hoffen wir auch herauszufinden, was unser Gehirn zu einem so fantastischen Organ macht, das uns über das Chiaroscuro bei Caravaggio ebenso tiefgründige Betrachtungen anstellen lässt wie über die Paradoxien der Quantenphysik. ~

MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de

Unser Online-Dossier »Hirnforschung« finden Sie unter
www.spektrum.de/gehirn

DER AUTOR

Henry Markram leitet das Blue Brain Project an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Lausanne. Er hat umfangreiche Forschungsarbeiten zur Neuronennetzen und deren Lernfähigkeit durchgeführt. Dabei entdeckte er einen grundlegenden Mechanismus für die Plastizität des Gehirns: dass sich die Übertragungsstärke von Synapsen je nach dem zeitlichen Muster der eintreffenden Signale erhöht oder erniedrigt (Spike-Timing Dependent Plasticity). Gemeinsam mit anderen Wissenschaftlern entwickelte er außerdem eine Theorie des Gehirns, die auch für das Human Brain Projekt eine Rolle spielt. Demnach handelt es sich um ein informationsverarbeitendes System, das in einem stetig fluktuierenden Zustand operiert – ähnlich den Überlagerungsmustern der Wellen in einer Flüssigkeit, die ständigen Störungen ausgesetzt ist (Liquid State Machine).

QUELLEN

Amari, S., et al.: Neuroinformatics: The Integration of Shared Databases and Tools Towards Integrative Neuroscience. In: Journal of Integrated Neuroscience 1, S. 117–28, 2002
Buesing, L., et al.: Neural Dynamics as Sampling: A Model for Stochastic Computation in Recurrent Networks of Spiking Neurons. In: PLoS Computational Biology 7, S. e1002211, 2011
Cuntz, H., et al.: One Rule to Grow Them All: A General Theory of Neuronal Branching and Its Practical Application. In: PLoS Computational Biology 6, S. e1000877, 2010
Perin, R. et al.: A Synaptic Organizing Principle for Cortical Neuronal Groups. In: Proceedings of the National Academy of Sciences 108, S. 5419–5424, 2011

LITERATURTIPP

Schürmann, F.: Das simulierte Gehirn. In Gehirn & Geist 6/2008, S. 56
Ausführliche Beschreibung des Blue-Brain-Projekts zur Simulation einer kortikalen Säule

WEBLINKS

www.humanbrainproject.eu
Die offizielle Website des Human Brain Project

ScientificAmerican.com/jun2012/brain-project
Video eines aktiven Neuronennetzwerks im Gehirn

www.heise.de/tr/artikel/Das-ist-nicht-der-Zugang-der-Physik-278031.html
Kritische Anmerkungen des Physikers Klaus Pawelzik zu den Hirnsimulationen des Autors

www.brain-map.org/
Website des Allen Brain Atlas, der für sämtliche Entwicklungsstadien des Gehirns die in jedem Areal aktiven Genen verzeichnet

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1157706**

Leserreisen – 2013

Spektrum der Wissenschaft bietet seinen Lesern im Frühjahr 2013 drei Spezial-Reisen an: zu den großen Observatorien nach Chile, zu den spektakulären Polarlichtern nach Lappland und zu einem exklusiven Besuch im CERN nach Genf.

Lappland

POLARLICHTREISE IN DEN HOHEN NORDEN

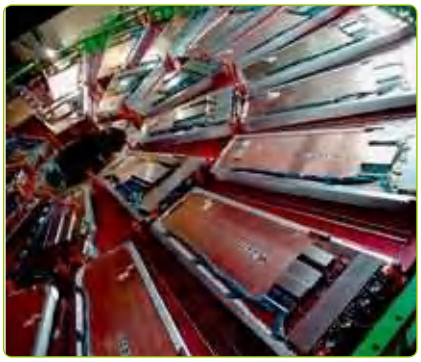
Diese beliebte Reise wird im nächsten Jahr noch interessanter: Viele fantastische Polarlichterscheinungen werden intensiver zu beobachten sein, da die Sonnenaktivität weiter gestiegen ist. Deshalb haben wir der Reise in Norwegen auf dem 70. Breitengrad einen Tag hinzugefügt.

Das Programm am Inarisee in Finnland und im Pasviktal in Norwegen an der russischen Grenze bietet neben geführten Polarlichtbeobachtungen bei stabilem Festlandklima und interessanten Vorträgen viele Winteraktivitäten: Husky-, Rentier- oder Schneescooter-Safaries und skandinavische Sauna sowie eine Königskrabben-Safari. Auch die lappländische Kultur der Samen wird bei dieser Reise nicht zu kurz kommen.

Falls Sie länger bleiben wollen, beginnt in Kirkenes eine sechstägige Kreuzfahrt entlang der malerischen norwegischen Küste nach Bergen. Bei dieser faszinierenden Hurtigrutenkreuzfahrt steuern wir viele Küstenstationen an: Hammerfest, Tromsø, die Inselwelt der Lofoten, Bodø, Trondheim und Bergen.

Unser erfahrener Polarlichtspezialist Joachim Biefang betreut die Reise mit Vorträgen und laserunterstützten Führungen am Nordhimmel. Ein handliches Planetarium und ein Teleskop sind auch mit dabei.

Hauptreise 6. 3. – 15. 3. 2013:
Preis € 2060,– im DZ/HP
Verlängerung 15. 3. – 21. 3. 2013:
Preis € 1860,– im DZ/VP



Genf

DIE SUCHE NACH DEM URSPRUNG DES UNIVERSUMS

Eingerahmt von den schneeweissen Gipfeln der Alpen und dem Spiegel des Genfer Sees, bietet Genf uns bei dieser viertägigen Kurzreise auch im Jahr 2012 die ideale Ausgangsposition für einen exklusiven Besuch beim CERN, der Europäischen Organisation für Kernforschung. Bei einer Sonderführung kommen wir in Genf dem wohl größten intellektuellen Abenteuer der modernen Forschung näher: der Suche nach dem Ursprung des Universums.

Zusätzlich haben wir am Anreisetag einen Vortrag zum Thema der Geschichte der Antimaterie und an einem weiteren Abend einen Vortrag eines erfahrenen CERN-Mitarbeiters zum Thema »Die Anfänge und die Arbeit am CERN« arrangiert. Ein fakultativer Ausflug zum Genfer See wird uns die Schönheit der Französischen Schweiz näherbringen. Auf dem Programm steht des Weiteren eine Rundfahrt zu den verschiedenen in Genf ansässigen Weltorganisationen (z. B. United Nations Office at Geneva, UNOG) sowie eine Besichtigung der UNO. Auf Grund der großen Nachfrage nach dieser Tour bieten wir sowohl einen Termin im Mai als auch einen im September zur Auswahl an. (Flüge sind nach Zürich, Basel oder Genf zubuchbar.)

Geplante Termine mit Eigenanreise:
im Mai und September 2013:
Preis € 620,– im DZ/HP

Chile

LAND DER GROSSEN OBSERVATORIEN

Eine astronomische Erlebnisreise zu den größten Sternwarten der Welt – unter der fachkundigen Leitung von Joachim Biefang. Astronomisches Highlight ist der Besuch der weltbekannten Großobservatorien Las Campanas, La Silla und natürlich des Cerro Paranal mit seinen berühmten 8.2 m VLT–Teleskopen und Interferometrieanlage. Auch der Besuch der Montagestation des ALMA-Projekts ist eingeplant. Landschaftlich stehen vor allem die Atacamawüste und die fantastische Welt der hohen Anden auf dem Programm: San Pedro de Atacama, die große Salzkordilliere, der viertgrößte Salzsee der Welt, die Hochlandlagunen des Altiplano und El Tatio Geysire.Teleskopbeobachtungen am eindrucksvollen Himmel der südlichen Hemisphäre ergänzen dieses erlebnisreiche Reiseprogramm. In einer 7-tägigen Verlängerung geht es nach Südchile – in das wildromantische Patagonien mit Magellanstraße, Torres del Paine Nationalpark, Gletscherwelten und Pinguinkolonien.

Hauptreise 5. 2. – 20. 2. 2013:
Preis € 4.130,– im DZ/F,
Verlängerung 19 .2.-26. 2. 2013:
Preis € 1.850,– im DZ/F

INFOPAKET UND BUCHUNG ÜBER:

Wittmann Travel
Urenfleet 6e
21129 Hamburg
Telefon: 040 851053-76
Fax: 040 851053-77
E-Mail: info@wittmann-travel.de

Neurone & Co. – Imitieren mit Silizium

Um Computern das Denken beizubringen und obendrein das Gehirn besser zu verstehen, bauen Forscher es aus elektronischen Bausteinen nach. Ihre Devise lautet dabei: Emulation statt Simulation.

Von Karlheinz Meier

Wer schon mal sein Notebook auf den Knien jonglierte, der weiß: Datenverarbeitung ist eine heiße Angelegenheit. Gut 40 Watt benötigt ein solcher Rechner im Betrieb – und gibt sie fast vollständig als Wärme wieder ab. Das ist etwa doppelt so viel, wie das menschliche Gehirn verbraucht, das seinen täglichen Energiebedarf aus zwei 200-Gramm-Bechern Fruchtjogurt decken könnte. Nun ist ihm zwar noch jeder Taschenrechner überlegen, wenn es gilt, große Zahlen miteinander zu multiplizieren. Doch wenn in unerwarteten Situationen Entscheidungen getroffen werden müssen, macht selbst der modernste Hochleistungsrechner dem Gehirn nichts vor.

Versucht man, diese Fähigkeit mit digitalen Computern zu simulieren, wachsen die Anforderungen ins Gigantische. Ausgedrückt in der »Fruchtjogurt-Metrik«: Ein Hochleistungsrechner verbraucht leicht 100 Kilowatt, entsprechend 10 000 Bechern Jogurt an einem Tag – ein echtes Problem. Die Lösung finden wir in einer Form der Informationsverarbeitung, die sich auf ihre Anfänge besinnt: mit analogen statt digitalen Schaltkreisen. Auf diese Weise wollen Forscher die Biologie nachahmen, statt sie zu simulieren – mit Hilfe »neuromorpher Rechner«.

Ein menschliches Gehirn besteht aus mindestens 100 Milliarden räumlich organisierten Nervenzellen, die ein paar Mal pro Sekunde Informationen in ein Netzwerk aus rund einer Billiarde Verbindungen speisen. Seine Arbeitsweise ist das Resultat der Evolution auf der einen sowie von Lern- und Entwicklungsprozessen des Individuums auf der anderen Seite. Ein Prozessor hingegen basiert auf einem Siliziumchip mit definierten funktionellen Einheiten, die im Gigahertztakt einer zentralen Systemuhr Daten austauschen und dabei Programmkodes abarbeiten.

Dieser liegt ebenso wie alle Daten binär vor, das heißt in einer Sprache, die allein aus den Zahlen »0« und »1« besteht.

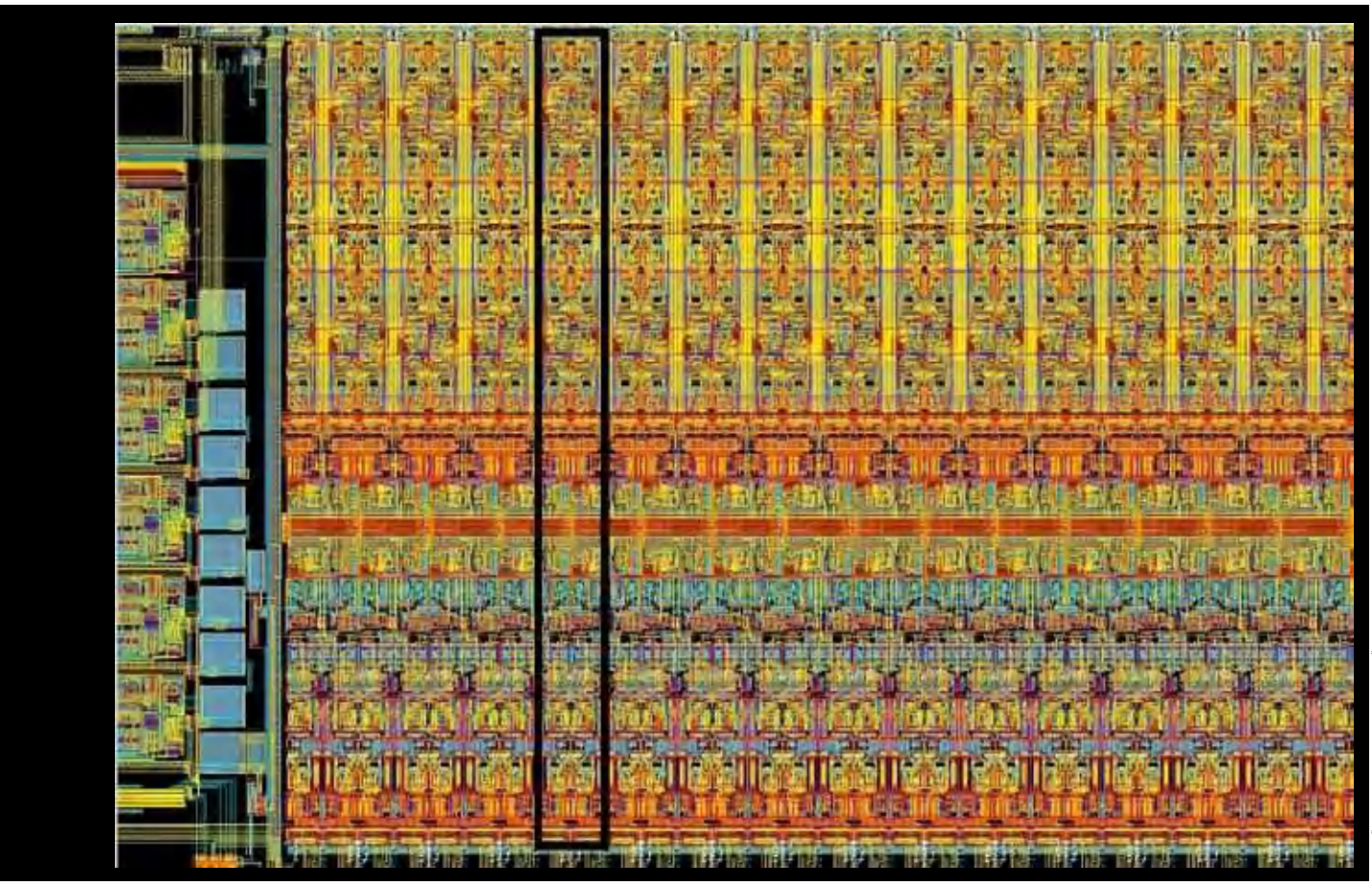
AUF EINEN BLICK

PHYSIKALISCHE MODELLE DES DENKENS

1 »Elektronengehirne« heutiger Bauart stellen Berechnungen weit schneller an als biologische, sind aber bei **kognitiven Prozessen** wie der Entscheidungsfindung deutlich unterlegen.

2 Die Computersimulation neuronaler Prozesse bildet mathematische Modelle dieser Abläufe als **digitale Schaltungsvorgänge** ab, ein energie- und zeitintensiver Umweg.

3 Im Rahmen des Forschungsprojekts FACETS und seines Nachfolgers BrainScaleS versuchen Neurowissenschaftler und Physiker deshalb, mit Transistoren, Kondensatoren und Widerständen das Verhalten der Grundbausteine des Gehirns – Neurone und Synapsen – nachzuahmen. Ihre **Emulationsschaltungen** arbeiten bereits zehn Milliarden Mal energiesparender und eine Million Mal schneller als digitale.



UNIVERSITÄT HEIDELBERG / KIRCHHOFF-INSTITUT FÜR PHYSIK

So genannte neuromorphe Chips ahmen die natürlichen Abläufe im Gehirn mit elektronischen Bauelementen nach. Wie komplex die Aufgabe ist, illustriert diese computergestützte Entwurfszeichnung eines Chips der jüngsten Generation: Ein in Silizium gefertigtes Neuron mit einer Länge von 150 Mikrometern entspricht dem hervorgehobenen rechteckigen Bereich. Einzelne Transistoren sind etwa 180 Nanometer lang.

Das lässt sich durch zwei Zustände eines Schalters technisch umsetzen. 1854 formulierte der britische Mathematiker George Boole (1815–1864) die Regeln und Verknüpfungen einer binären Algebra. Der amerikanische Mathematiker und Elektrotechniker Claude Shannon (1916–2001) zeigte 1937, dass Schalter tatsächlich geeignet sind, mit dieser zu rechnen. Ein Jahr zuvor hatte der britische Logiker Alan Turing (1912–1954) bewiesen, dass eine Maschine jedes mathematische Problem lösen kann, das sich als Algorithmus, also als eine Abfolge symbolischer Befehle, formulieren lässt (siehe Spektrum der Wissenschaft 6/2012, S. 80). Schließlich entwickelte der Physiker John von Neumann (1923–1958) die nach ihm benannte Computerarchitektur, bei der ein gespeicherter Algorithmus in Form eines Programms digitale Daten in einem Rechenwerk verarbeitet.

Das Gehirn läuft niemals heiß

Mit dem Transistor stand bald ein elektrisch steuerbarer Schalter bereit. Dem amerikanischen Ingenieur und Nobelpreisträger Jack Kilby (1923–2005) von Texas Instruments gelang es 1958, diese mit anderen Bauelementen in »integrierten Schaltungen« unterzubringen – den Chips. Bis heute nimmt die Integrationsdichte rasant zu. Laut Gordon Moore, Mitbegründer von Intel, soll sich die Zahl der Transistoren auf einem Chip alle 18 Monate verdoppeln. Das geht freilich auf Kosten der Größe jedes einzelnen. Ein moderner Intel-I7-Chip vereint auf 250 Quadratmillimetern bereits etwa eine Milliarde Transistoren.

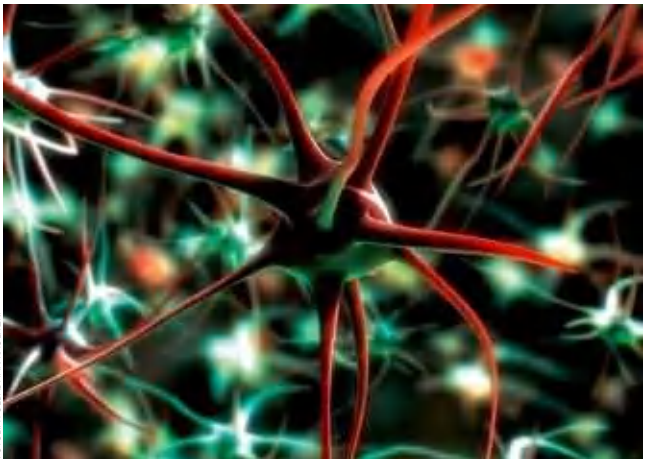
Dass diese Reise nicht unbegrenzt weitergehen kann, wissen Ingenieure und Wissenschaftler seit Langem. Schon heute repräsentieren Transistoren Nanotechnologie. Weiteres Schrumpfen bewegte sich in den Dimensionsbereich atomarer Strukturen hinein. Damit aber würde die Wahrscheinlichkeit für Produktionsfehler steigen. Schon wenige defekte Transistoren unter einer Milliarde können einen Chip jedoch funktionsunfähig machen.

Obendrein dient die wachsende Integrationsdichte meist auch zur Steigerung der Taktzyklen, mit denen aber der Energieverbrauch wächst. Darum bilden zwei bis drei Gigahertz eine Art magische Grenze.

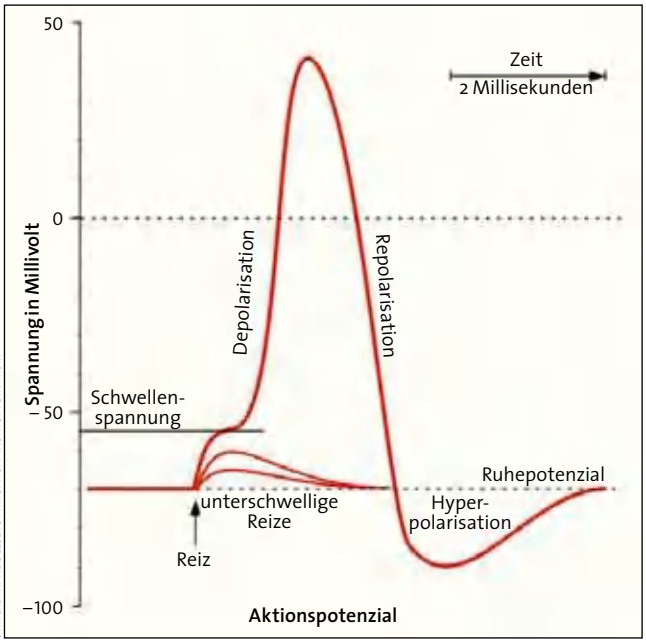
Es ist offensichtlich, dass die biologischen Mechanismen der Informationsverarbeitung anders organisiert sein müssen, denn unser zentrales Nervensystem läuft niemals heiß,

und mögen wir noch so viel grübeln. Aber wie? Bereits Ende des 19. Jahrhunderts untersuchte der spanische Mediziner Santiago Felipe Ramón y Cajal (1852–1934) Hirnschnitte mittels der so genannten Golgi-Färbetechnik und erkannte, dass dieses Gewebe aus einem engmaschigen Netzwerk von Zellen aufgebaut ist. Diese »Neurone« kommunizieren unter anderem über elektrische Signale, die auf Nervenbahnen durch das Gehirn reisen.

Die Membran eines Neurons dient dabei als ein zentrales Schaltungselement: Sie isoliert die Zelle, hat jedoch eine Vielzahl selektiver Kanäle für bestimmte geladene Atome. Zwischen dem Innenraum und der Außenwelt besteht normalerweise eine Spannung von minus 70 Millivolt. Treffen dort elektrische Signale anderer Neurone ein, über dünne Fasern zugeleitet, kann sie einen Schwellenwert von etwa minus 55 Millivolt erreichen. Dann schnellt sie auf fast plus 50 Millivolt hoch und fällt anschließend steil unter den Ruhespannungswert ab, um sich dann wieder auf diesen einzupegeln (siehe Grafik unten). All dies geschieht in wenigen Millisekunden, weshalb ein solches »Aktionspotenzial« auch als »Spike« (Nadelimpuls) bezeichnet wird. Aus der Sicht des Informationstheoretikers folgt dieser Vorgang einem »Alles-oder-nichts-Gesetz«: Unabhängig von der Vorgeschichte der Zelle sehen alle Spikes weit gehend gleich aus.



FOTOLIA / SEBASTIAN KAULITZKI



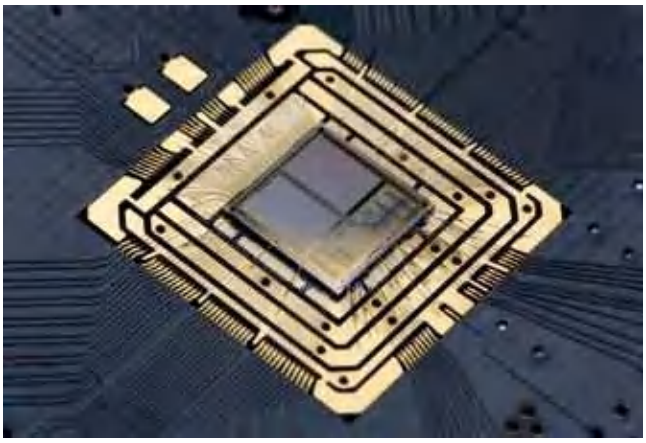
UNIVERSITÄT HEIDELBERG / KIRCHHOFF-INSTITUT FÜR PHYSIK

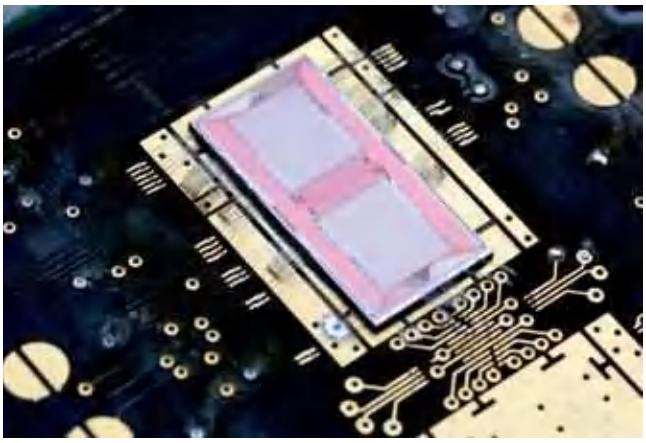
Neurone sind die Grundbausteine des Gehirns. Ankommende elektrische Signale können, sofern sie einen Schwellenwert überschreiten, die Spannung der Zellmembran innerhalb weniger Millisekunden massiv steigern und schließlich sogar vorübergehend umpolen. Dieser pulsartige Standardverlauf wird Aktionspotenzial oder auch Spike genannt. Er ist die Basis der Kommunikation zwischen natürlichen Neuronen wie zwischen ihren elektronischen Pendants.

Synapsen schließlich sind die Kopplungsstellen zwischen Neuronen und den Leitungen, über die sich Aktionspotenziale ausbreiten. Neurotransmitter genannte Moleküle übernehmen hier den Signaltransfer, die Information wird vorübergehend chemisch umkodiert. Zudem ist dieser Transfer gerichtet: vom Axon (präsynaptische Seite) zum Dendriten (postsynaptische Seite). Laut Messungen muss das resultierende elektrische Signal, das schließlich eine Neuronenmembran erreicht, nicht identisch mit dem ursprünglichen sein. Die Synapse kann dieses vielmehr verstärken, aber auch dämpfen oder gar unterdrücken. Über einen längeren Zeitraum kann sich dabei eine »synaptische Plastizität« ergeben, die das neuronale Netz bei Lernprozessen neu organisiert.

Im Vergleich zu den Nanosekundentaktzyklen eines Prozessors liegen die Zeitkonstanten solcher Vorgänge im Gehirn im Millisekundenbereich, also eine Million Mal langsamer. Das ist geradezu ein Schneckentempo, erklärt aber teilweise den geringen Energieverbrauch. Zum Ausgleich arbeiten die Millionen Neurone hochgradig parallel, was nicht nur komplexe Verschaltungsmöglichkeiten bietet, sondern auch die Empfindlichkeit gegenüber lokalen Fehlfunktionen verringert. Selbst millionenfacher Neuronenverlust durch Unfall oder Krankheit lässt sich oft in Maßen tolerieren. Hier haben die Hardwareentwickler gelernt: Kaum ein Notebook, das heutzutage nicht mindestens zwei Rechnerkerne gleichzeitig nutzt; in Supercomputern verrichten bis zu eine Million ihren Dienst.

Letztere fungieren als Arbeitspferde bei Computersimulationen – dem dritten Weg der Naturwissenschaft neben Experiment und Theoriebildung. Insbesondere lässt sich damit das Verhalten von Vielteilchensystemen studieren, vom Kristallgitter bis zum Universum, von der Wettervorhersage bis zur Klimaprognose. Meist sind die Komponenten des fraglichen Systems sowie deren Wechselwirkungen untereinander gut bekannt und durch mathematische Gleichungen beschreibbar. Ein Simulationsmodell – letztlich eine Vielzahl verknüpfter Formeln – wird dann unter bestimmten Anfangsbedingungen durchgerechnet, die den jeweiligen Fragestellungen entsprechen. Durch Abgleich mit Beobachtungen und experimentellen Werten lässt sich das Modell verbessern; mitunter ergeben sich sogar Hinweise auf unbekannte Faktoren. Ein Beispiel für solches »reverse engineering« liefern Astrophysiker, die aus den Abweichungen ihrer Simulationen





BEIDE FOTOS: UNIVERSITÄT HEIDELBERG / KIRCHHOFF-INSTITUT FÜR PHYSIK

Generationswechsel: Auf dem neuromorphen Chip des FACETS-Projekts (links) wurden etwa 100 000 Synapsen, jede etwa zehn mal zehn Mikrometer groß, in zwei Feldern (graue Flächen) elektronisch realisiert. Rechts davon befindet sich eine digitale Kontrolllogik, der schmale Streifen dazwischen enthält rund 400 Neurone. Der Chip aus dem BrainScaleS-Projekt (rechts) enthält bereits 125 000 Synapsen, die sich über 512 Membranschaltkreise verknüpfen lassen. Daraus resultieren Neurone mit bis zu 16 000 synaptischen Eingängen, die sich plastisch verhalten, also lernfähig sind. Auch hier sind die Synapsen in zwei Feldern organisiert, zwischen denen die Neurone liegen (siehe auch Bild S. 99). 400 solcher Chips sind auf einem Wafer integriert. Golden erscheinen jeweils die elektrischen Kontakte.

des Universums auf die Eigenschaften dunkler Materie schließen, die sich bislang der direkten Beobachtung entzieht.

Auch für die Eigenschaften und die Dynamik von Neuronen und Synapsen gibt es mathematische Modelle, die Forscher direkt aus neurobiologischen Daten abgeleitet haben. Den bislang ambitioniertesten Versuch, einen neuronalen Schaltkreis zu simulieren, unternimmt derzeit der Neurowissenschaftler Henry Markram von der Schweizer École Polytechnique Fédérale de Lausanne mit seinem Team auf einem IBM BlueGene/P mit 16 384 Rechenkernen. Er hat in den letzten Jahren ein detailliertes Modell einer kortikalen Säule der Ratte entwickelt (siehe den Beitrag ab S. 82) und plant nun, es auf große Systeme zu erweitern.

Eine solche Säule ist im Prinzip ein ungeheurer Schaltkreis, der sich durch alle sechs Schichten der Großhirnrinde erstreckt und etwa 10 000 Neurone und 100 Millionen synaptische Verbindungen umfasst. Dabei nutzt die Forschergruppe in bisher nicht gekanntem Umfang experimentelle Daten, sei es aus der Genetik oder aus der Zellbiologie.

120 Millionen Becher Jogurt pro Sekunde

Bei allen Erfolgen hat Markrams Vorgehensweise jedoch einen Nachteil: Für die Simulation einer Sekunde Lebenszeit benötigt der BlueGene/P zirka 100 Sekunden. Bei einer elektrischen Leistung von 100 Kilowatt kostet das – in die vorne erwähnte anschauliche Währung umgerechnet – zwölf Becher Fruchtjogurt. Das menschliche Gehirn ist etwa zehn Millionen Mal größer als die hier simulierte kortikale Säule. Eine Sekunde Lebenszeit auf diesem Supercomputer durchzurechnen, würde demnach den Energieinhalt von 120 Millionen Bechern kosten statt der vom biologischen Vorbild pro Sekunde verbrauchten fünf Milligramm Fruchtjogurt! Im Vergleich zum Säugergehirn wäre der – in dieser Größe freilich heute noch hypothetische – BlueGene/P ein Energiefresser und obendrein 100-mal langsamer.

Woher kommt dieser gewaltige Unterschied? Die Antwort auf diese Frage findet sich im Umweg über die Digitaltechnik. So modelliert man beispielsweise den zeitlichen Verlauf der Membranspannung eines Neurons mathematisch durch eine Exponentialfunktion. Diese Idealisierung der Wirklichkeit muss für den Digitalcomputer, der nur mit 0 und 1 hantieren kann, durch numerische Näherungsverfahren ersetzt werden. Diese erfordern sehr viele kleine Rechenschritte und Speicherzugriffe. Da Rechenwerk und Speicher in der Von-Neumann-Architektur voneinander getrennt sind, werden also Unmengen an Daten auf dem Chip hin- und hergeschoben. Und das kostet Energie.

Biologische Schaltkreise funktionieren offensichtlich völlig anders. Trotz des Alles-oder-nichts-Prinzips der Spikes, das eine binäre Datenverarbeitung nahelegt, entsprechen diese offenbar nicht den Gesetzen boolescher Algebra. Alternativ zur Simulation bietet es sich deshalb an, das Gehirn zu »emulieren«. Darunter versteht man die direkte Abbildung eines Systems auf ein physikalisches Modell. Dergleichen war in den 1950er und 1960er Jahren ein beliebtes Mittel. So diente ein Raster aus einstellbaren Kondensatoren, Widerständen und Verstärkern zur Emulation der Flugbahnen von Elementarteilchen im Magnetsystem eines Teilchenbeschleunigers. Weil die aufkommende Digitaltechnik aber so viel flexibler und universeller einsetzbar war, verloren »analoge Rechner« an Bedeutung. Neuerdings erleben sie durch synthetische Quantensysteme eine Renaissance: Einige we-

nige Ionen oder Atome werden durch allerlei physikalische Kniffe zu einem synthetischen Vielteilchensystem, an dem man kontrolliert Experimente durchführen kann – weit besser als an einem »echten« Vielteilchensystem oder in einer Simulation, denn auch hier ist die Berechnung auf Supercomputern extrem zeit- und energieaufwändig.

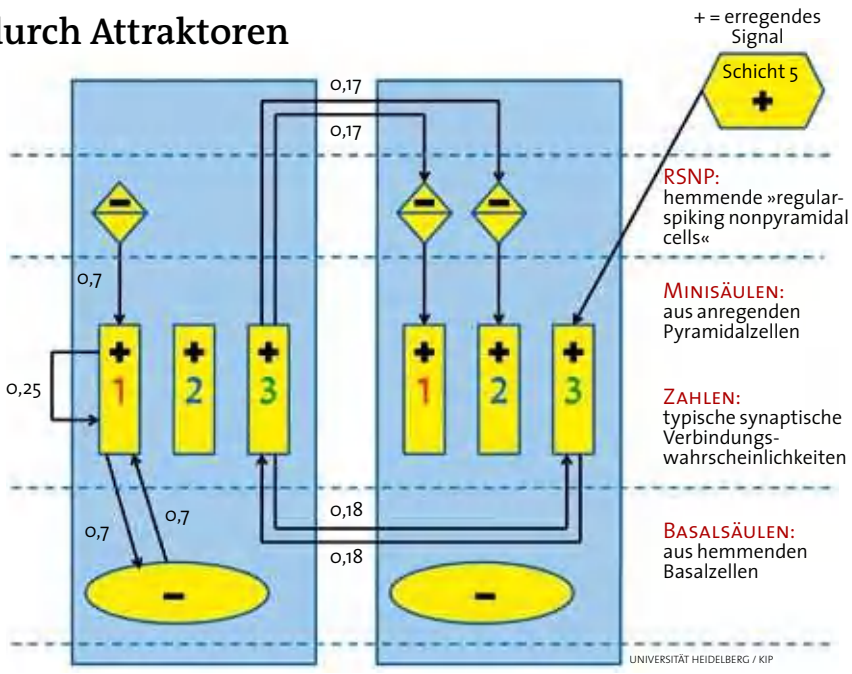
Die Idee eines physikalischen Modells neuronaler Schaltkreise brachte der amerikanische Physiker Carver Mead 1989 ins Spiel. Seine »neuromorphe Elektronik« nutzt die physikalischen Eigenschaften elektronischer Bauelemente für die Emulation biologischer Komponenten. Beispiel Transistor: In der Digitaltechnik wird er als Schalter eingesetzt, der bei entsprechender Polung der angelegten Spannung jeden Stromfluss unterbindet. Tatsächlich aber ist dieser nichtleitende Transistor eine Idealisierung: Es gibt immer einen – freilich geringen – Stromfluss. Dieser wächst exponentiell mit der angelegten Steuerspannung.

Die von Meads Arbeitsgruppe und anderen Forschern realisierten Schaltungen konnten einige Charakteristika biologischer Systeme emulieren und verbrauchten dabei weniger Leistung als Computersimulationen, wobei die Natur immer noch effizienter war. Immerhin liefen die Systeme sozusagen in biologischer Echtzeit – eine Sekunde Lebenszeit entsprach auch einer Sekunde Rechenzeit. Sie waren aber lediglich für Netzwerke aus einigen hundert Neuronen ausgelegt. Eine Skalierung auf biologisch relevante Größenordnungen – schon die Taufliege verfügt über 1000-mal so viele – oder gar auf die 100 Milliarden Neurone des menschlichen Gehirns ist freilich unmöglich: Die Elektronik würde zu voluminös, vor allem aber werden die sich ausbreitenden analogen Signale in großen Netzen undeutlich. Auch wurden wichtige Eigenschaften des natürlichen Vorbilds wie die Fähigkeit zu lernen nicht implementiert.

Seit 2005 fördert die Europäische Kommission im Rahmen ihres Programms »Future and Emerging Technologies (FET)« die Entwicklung eines neuromorphen Computers, dessen Architektur ganz und gar auf dem Wissen der Neurobiologen basiert. Das von mir konzipierte und koordinierte Projekt trug den Namen FACETS als Akronym für seinen wissenschaftlichen Ansatz: »Fast Analog Computing with Emergent Transient States« – Schnelligkeit sowie die Umsetzung dynamischer Prozesse in neuronalen Netzwerken waren die Hauptziele der beteiligten Forscher. Seit 2011 läuft unser Anschlussprojekt BrainScaleS.

Die Hardwarearchitektur setzt von vornherein auf Skalierbarkeit, verwendet also modulare Grundbausteine aus Transistoren, Kondensatoren und Widerständen, um Neurone und Synapsen zu emulieren, aus denen neuronale Schaltkreise bestehen. Im Unterschied zu anderen neuromorphen Modellen erfolgt die Kommunikation zwischen den Modulen über idealisierte Aktionspotenziale. Auch wenn sich natürliche Spikes nicht nach den Regeln der boolschen Algebra ver-

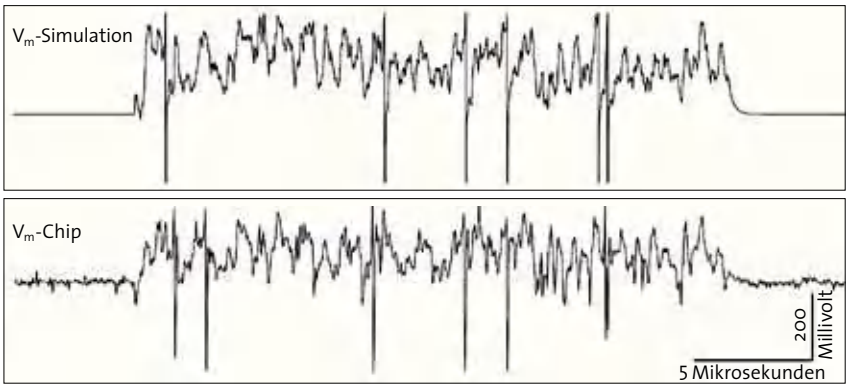
Entscheidungsfindung durch Attraktoren



Die schematische Darstellung zeigt eine »Winner-takes-all«-Schaltung, ein Neuronennetzwerk, wie es vermutlich in der Hirnrinde unter verschiedenen Möglichkeiten eine auswählt. Die von Anders Lansners Team an der KTH Stockholm entwickelte Architektur kann mit neuromorphen Chips zur Entscheidungsfindung eingesetzt werden. Sie besteht aus emulierten Pyramidenzellen, einem erregenden Neuronentyp, sowie zwei hemmenden Zelltypen: den so genannten »regular-spiking nonpyramidal cells« (RSNP) und den Basalzellen. Deren Aufgabe ist es, die Aktivität der Pyramidenzellen wieder einzudämmen. Die Entscheidungsfindung vollzieht sich im Wechselspiel zwischen Erregung und Hemmung.

Das Schema zeigt die Schichten zwei und drei der insgesamt sechs Zellschichten des Kortex. Die Pyramidalzellen sind zu »Minisäulen« beziehungsweise Attraktoren verschaltet, je drei davon wieder zu »Hypersäulen«. Attraktoren versuchen einerseits durch Aussenden von Spike-Serien ihren Einfluss in anderen Hypersäulen zu verstärken, andererseits den der anderen durch hemmende Verbindungen zu unterdrücken. Im emulierten Netzwerk sorgen statistische Fluktuationen für Dynamik, am Ende setzt sich ein Attraktor durch.

BEIDE ABBILDUNGEN: UNIVERSITÄT HEIDELBERG / KIRCHHOFF-INSTITUT FÜR PHYSIK



Die am Heidelberger Kirchhoff-Institut für Physik aufgebaute »Hybrid Multiscale Facility« (links) ist ein Hybrid aus einem neuromorphen System und einem klassischen Computercluster. Sie erzeugt 50 Millionen plastische synaptische Verbindungen unter bis zu 200 000 Neuronen (das Wafersystem befindet sich in dem achteckigen Kühlkörper). Mit dieser Apparatur lassen sich auch die Ergebnisse von Simulation und Emulation vergleichen (oben): Auf einen Reiz reagiert ein Neuron, indem es eine Salve von Aktionspotenzialen in zufälliger Abfolge erzeugt. Die beiden Verfahren ergeben zwar ähnliche Antwortkurven, aber durchaus auch Unterschiede. So wie es in der Natur der Fall ist, beginnt und endet beispielsweise die Kurve des physikalischen Modells (untere Grafik) nicht exakt mit dem Ruhewert, sondern variiert unablässig.

halten, nutzt FACETS ihren binären Charakter, um sie digital zu realisieren. Dabei werden Erzeugung und Weiterleitung aber nicht – wie beim Computer – von einer Systemuhr gesteuert. Weil Information hier zum einen analog in Form eines emulierten Membranpotenzials, zum anderen digital als Spike vorliegt, sprechen Experten von einer »mixed-signal«-Technologie. Fundamental verschieden von der konventionellen Digitaltechnologie sind dabei die kontinuierlich, statt in kleinen Schritten ablaufenden emulierten Prozesse und die fehlende Synchronisierung durch eine externe Uhr.

Der Entwurf von Neuronen und Synapsen berücksichtigt jüngste Ergebnisse neurobiologischer Forschung, insbesondere das »adaptive exponential integrate-and-fire model« der Gruppe von Wulfram Gerstner, ebenfalls an der École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Das kurz AdEx genannte Modell beschreibt das Verhalten eines Neurons der Großhirnrinde mit zwei mathematischen Gleichungen: Die erste stellt die Dynamik des Aktionspotenzials dar und enthält einen Aktivierungsterm mit einer exponentiellen Spannungsabhängigkeit. Diese Spannung ist mit einer zweiten Gleichung gekoppelt, die Adaptionsmechanismen beschreibt. Nach einem Spike wird das Neuron wieder in den Ausgangszustand zurückgesetzt. Dieses Modell kann diverse neuronale Aktivierungsmuster darstellen, auch das als »bursting« bezeichnete Feuern von Spikes in Gruppen – dieser Effekt verstärkt die Reaktion des postsynaptischen und damit den Einfluss des präsynaptischen Neurons. FACETS übersetzt die Gleichungen in entsprechende analoge elektronische Schaltungen.

Wichtig ist auch die Beobachtung von Markram und Misha Tsodyks vom israelischen Weizman-Institut aus dem Jahr 1997, wonach eine kurzzeitige, starke Stimulation auf präsynaptischer Seite entweder zu einer Abschwächung oder Erhöhung des Ausgangssignals führt – Synapsen können sogar als Kausalitätsdetektoren fungieren: Feuert die präsynaptische Zelle kurz vor der postsynaptischen, wird die Verbindung gestärkt. Dieses als »spike-timing-dependend-plasticity« bezeichnete Phänomen ist wichtig für Lernprozesse in neuronalen Schaltkreisen und wird deshalb auch bei FACETS emuliert.

10 000-mal schneller als das Gehirn

Da es keine steuernde Uhr wie bei einem digitalen Computer gibt, bestimmen die individuellen Zeitkonstanten der elektronischen Komponenten die Geschwindigkeiten der Abläufe im Schaltkreis. So liegt die Zeit für die Be- und Entladung einer Membran bei nur zehn Nanosekunden.

Freilich müssen alle Zeitkonstanten im Netzwerk konsistent sein. Die Membran, die postsynaptischen Potenziale und die emulierten Plastizitätsmechanismen dürfen in ihrer Dynamik relativ zueinander nicht von den Verhältnissen beim biologischen Vorbild abweichen. Insgesamt aber ist die FACETS-Implementierung sogar etwa 10 000-mal schneller als dieses. Das erlaubt es, nicht nur eine Sekunde Hirnaktivität, sondern auch länger dauernde Prozesse zu emulieren: Während eine Synapse ankommende Signale innerhalb von Millisekunden als Ursache oder Wirkung klassifiziert, nehmen Lern- und Entwicklungsprozesse Tage bis Monate in Anspruch; die Evolution unserer kognitiven Ausstattung benötigte bekanntlich Zehntausende von Jahren. Simulationen auf Hochleistungsrechnern wie dem BlueGene/P benötigen aber drei Monate Rechenzeit, um einen biologischen Tag abzuarbeiten. Keine Chance also, beispielsweise ein numerisches Großexperiment viele tausend Mal zu wiederholen,

um Parameter zu optimieren und neue Erkenntnisse zu gewinnen. FACETS hingegen emuliert einen biologischen Tag in nur zehn Sekunden.

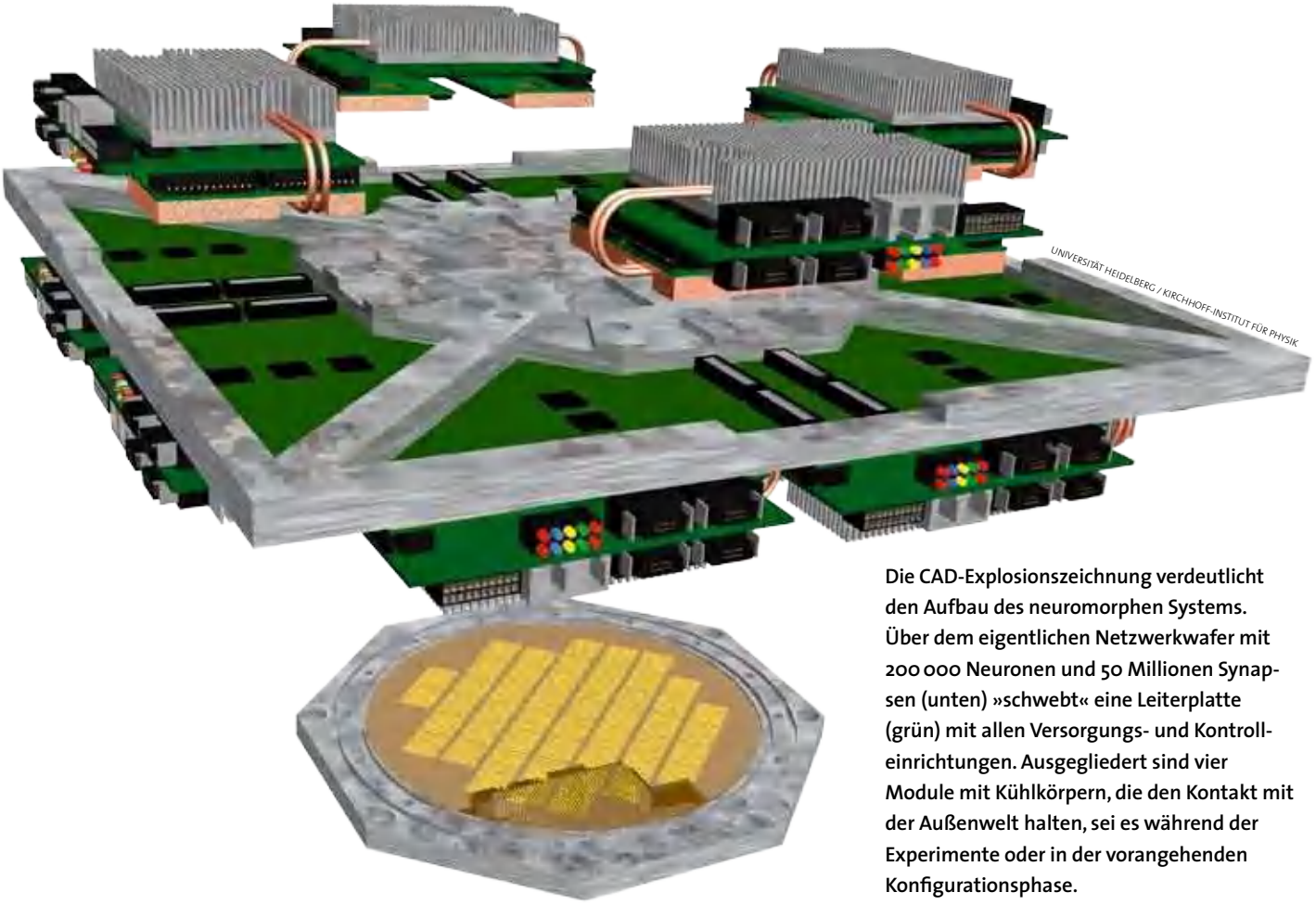
Wie lässt sich ein neuromorpher Rechner in Silizium umsetzen? Da ein Neuron 10 000 oder mehr Signaleingänge haben kann, dominieren Synapsen und deren Verbindungen zwangsläufig die Fläche eines Chips. Beim Schaltungsentwurf galt es also, eine hohe Dichte von Kontaktstellen zu schaffen und diese Elemente mit den Neuronen zu verbinden. Man erreicht das zum Beispiel durch Schalter in Kreuzungspunkten elektrischer Leitungen (»cross-bar-switch«) oder so genannte Multiplexer, die Leitungen in einem Netzwerk bündeln und Informationen gezielt weiterschalten.

Ein konventioneller Siliziumchip misst zwischen einigen Millimetern und einem Zentimeter Kantenlänge; er wird in großer Zahl aus einem Wafer hergestellt, einer Siliziumscheibe von 20 Zentimeter Durchmesser. Solch ein Chip bietet aber nur Platz für gut 100 Neurone und einige 100 000 Synapsen. Das FACETS-Team entschied daher bald, komplette Wafer zu verwenden. Das erforderte eine Anpassung in der Fertigungstechnik, denn die normalerweise darauf angelegten Schaltungen sind untereinander nicht elektrisch verbunden – solche in der Mitte des Wafers zu kontaktieren, ist schwierig. Gemeinsam mit dem Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration in Moritzburg lösten wir das Problem durch eine zusätzliche, den gesamten Wafer überdeckende Metallschicht. Dass keine Möglichkeit besteht, die unvermeidlichen Produktionsfehler durch Aussortieren der defekten Chips zu lösen, war hingegen unproblematisch: Anders als digitale Schaltungen sind die elektronischen fehlertolerant. Ein paar emulierte Synapsen mehr oder weniger – wie in der Biologie spielt das auch hier keine Rolle.

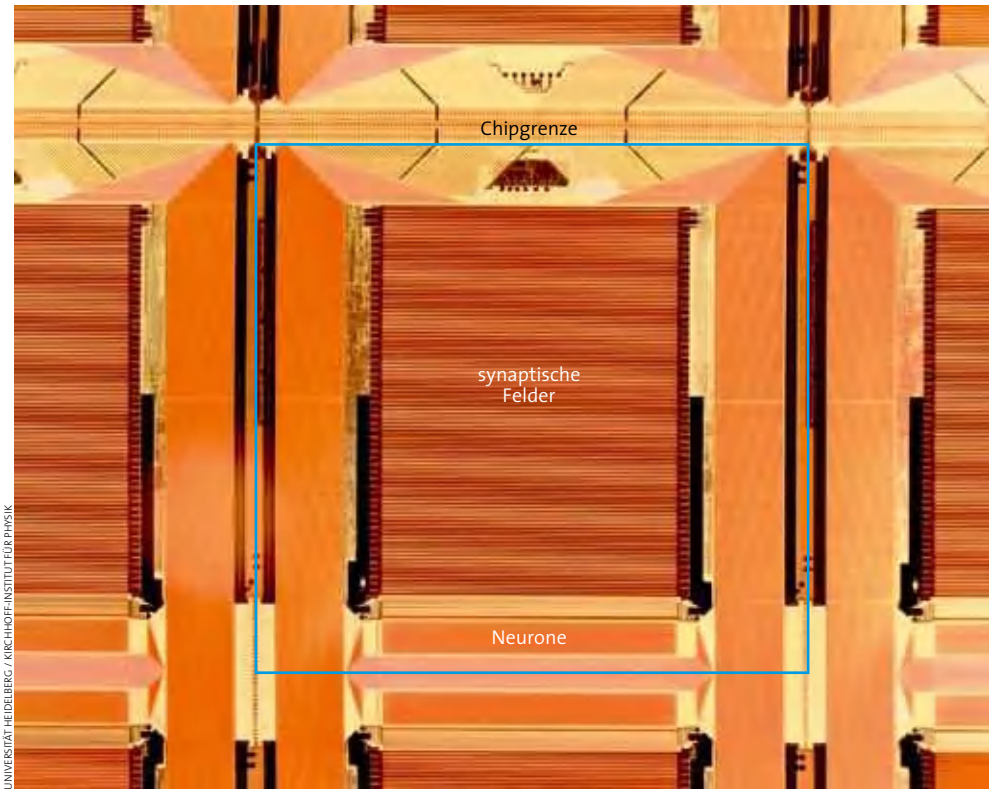
»Wer mit wem?« fein justieren

Der aktuelle Netzwerkwafer umfasst etwa 200 000 Neurone, die durch 50 Millionen lernfähige Synapsen miteinander verbunden werden können. Eine einzelne Synapse hat eine Seitenlänge von zehn Mikrometern. Entscheidend bei diesem System ist, dass sich die Eigenschaften der Modelle der Neurone und Synapsen fein justieren lassen. Auch die Struktur des Verbindungsnetzwerks – also das »Wer mit wem?« – kann nach Belieben gestaltet werden. Bei laufendem Betrieb fließen auf dem Wafer mehr als zehn Terabit pro Sekunde; etwa genauso groß ist der Datenaustausch mit der Außenwelt – vergleichbar einem Experiment des Beschleunigers Large Hadron Collider (LHC) in Genf.

Mit diesem System lassen sich beispielsweise kognitive Mechanismen der Entscheidungsfindung untersuchen, um-



Die CAD-Explosionszeichnung verdeutlicht den Aufbau des neuromorphen Systems. Über dem eigentlichen Netzwerkwafer mit 200 000 Neuronen und 50 Millionen Synapsen (unten) »schwebt« eine Leiterplatte (grün) mit allen Versorgungs- und Kontrolleinrichtungen. Ausgegliedert sind vier Module mit Kühlkörpern, die den Kontakt mit der Außenwelt halten, sei es während der Experimente oder in der vorangehenden Konfigurationsphase.



UNIVERSITÄT HEIDELBERG / KIRCHHOFF-INSTITUT FÜR PHYSIK

Die Mikroskopaufnahme zeigt die Hälfte eines Chips von insgesamt 384 auf einem BrainScaleS-Netzwerkwafer. Man erkennt das Feld der 224 mal 256 plastischen Synapsen sowie einen Streifen mit 256 Neuronenschaltkreisen. Alle umliegenden Strukturen dienen dem Versenden und Empfangen von Spikes.

gekehrt aber auch die gewonnenen Erkenntnisse nutzen, um einen Entscheidungsprozess zu unterstützen. Wie kann das Gehirn etwa aus ähnlich klingenden Schallereignissen Wörter verstehen? Eine Möglichkeit sind so genannte Attraktornetzwerke (siehe Kasten S. 96): Gruppen von Neuronen repräsentieren dabei mögliche Deutungen von Eingangssignalen. Indem sie einerseits Informationen weitergeben, andererseits ihre »Konkurrenten« hemmen, entsteht ein Wettbewerb, bei dem sich schließlich eine Gruppe durchsetzt. In unseren Versuchen damit machte es nichts aus, wenn bis zu einem Fünftel der synaptischen Verbindungen ausfielen – das System erwies sich als sehr fehlertolerant.

Ist dies nun aber auch, verglichen mit unserem Gehirn, ein effizientes System? Der Wafer verbraucht für die synaptischen Vorgänge bis zu ein Kilowatt, das scheint viel. Die erforderliche Energie, ein einzelnes Aktionspotenzial zu erzeugen und im Netzwerk zu verteilen, beträgt aber nur etwa 0,1 Nanojoule. Das Gehirn erledigt diese Aufgabe immer noch um den Faktor 10 000 besser (zehn Femtojoule), aber FACETS ist bereits zehn Milliarden Mal effizienter als der BlueGene/P-Rechner (ein Joule) mit einem zugegebenermaßen präziseren Modell.

Seit 2011 wird FACETS mit dem BrainScaleS-Projekt fortgeführt. Hier wollen wir neuromorphe und digitale Computer zu Hybridsystemen kombinieren. Letztere stellen dabei beispielsweise die Eingangsdaten zur Verfügung und fassen die emulierten Ergebnisse der Elektronik zusammen, um sie in eine zu den Messungen der Neurobiologie kompatible Form zu bringen. Eine weitere ganz entscheidende Funktion der Hybridsysteme ist die Durchführung so genannter »closed-loop«-Experimente, in denen das neuromorphe System mit einer virtuellen Umgebung wechselwirkt. So lassen sich Lern- und Entwicklungsprozesse emulieren. Bis neuromorphe Computer die Komplexität ganzer Gehirnareale erreichen, wird noch einige Zeit ins Land gehen – kleinere Systeme könnten aber bald auch für kommerzielle Anwendungen zur Verfügung stehen.

DER AUTOR

Der Physiker **Karlheinz Meier** lehrt und forscht am Kirchhoff-Institut für Physik der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg. Er ist Koordinator des BrainScaleS-Projekts und Kodirektor des geplanten Europäischen HBP-Flagship-Projekts.

QUELLEN

Brüderle, D. et al.: A Comprehensive Workflow for General-Purpose Neural Modeling with Highly Configurable Neuromorphic Hardware Systems. In: Biological Cybernetics 104(4–5), S. 263–296, 2011
Indiveri, G. et al.: Neuromorphic Silicon Neuron Circuits. In: Frontiers in Neuromorphic Engineering 10.3389/fnins.2011.00073
Mead, C.: Analog VLSI and Neural Systems. Addison Wesley Publishing Company, Boston 1989

WEBLINK

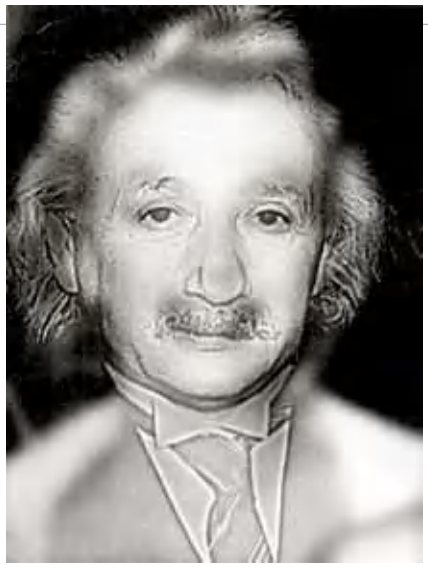
Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1157707**

Brian Greene
Die verborgene Wirklichkeit
Paralleluniversen und die Gesetze des Kosmos
Aus dem Englischen von Sebastian Vogel.
Siedler, München 2012. 448 S., € 24,99

ASTRONOMIE

Im Wunderland der Kosmologen

Brian Greene führt uns in schwindelnde Höhen der Theorie, wo Universen wie Brotscheiben herumschweben oder sich schneller vermehren als die Karnickel.



Eine Stringtheorie geht so bruchlos in die andere über wie auf diesem Bild Albert Einstein (aus der Nähe betrachtet) in Marilyn Monroe (aus großer Entfernung).

Laut Wittgenstein sollte die Welt »alles« sein, »was der Fall ist«, die »Gesamtheit der Tatsachen, nicht der Dinge«. Aber selbst wenn man immer wüsste, was so alles der Fall ist, müsste man bei Brian Greenes neuestem Buch in tiefstes Grübeln verfallen. Da geht es andauernd um »alles«, aber nun ist es das Universum und mehr, nämlich das Multiversum mit all seinen, womöglich unendlich vielen Paralleluniversen.

Und die sind nicht etwa irgendwann einmal entstanden, denn schließlich kennt man im Megamultiweltall keine globale Zeit, in der sich für jede Universumsgeburt Vergangenheit von Zukunft unterscheiden ließe. Vielmehr könnte »inflationäre Expansion«, so Greene, »in weit entfernten Bereichen auch gerade jetzt ein Universum nach dem anderen hervorbringen«.

Um das zu verdauen, hilft es vielleicht, zwischen Wirklichkeit und Realität zu unterscheiden. Erstere ist eine Sonderform der Realität; sie betrifft die Dinge, die »eine Wirkung haben oder ausüben« können. So sind Zahlen zwar Teil der Realität, aber nicht der Wirklichkeit. Und das »wirkliche« Universum wäre dann eben nur unser eigenes, kein anderes paralleles.

Solche Vorbetrachtungen sind vielleicht nötig, um dem theoretischen Physiker von der Columbia University in seinem Buch folgen zu können. Brian Greene ist einer der führenden Erforscher der Stringtheorie, Buchautor (»Das elegante Universum«, siehe Spektrum der Wissenschaft 8/2000, S. 106), prominenter Wissenschaftskommunikator, Mitbegründer des World Science Festivals in New York und im US-Fernsehen präsent wie einst der Astronom und Sciencefiction-Autor Carl Sagan.

Was an einem Universum elegant sein soll, liegt sicher im Auge seines Betrachters – der Menschheit natürlich. Wenn man heute Kosmologen und Teilchenastrophysikern lauscht, sieht es merkwürdig bis bizarr aus. Es ist das Verdienst dieses Buchs, alle Gedanken, Modelle und Thesen zum Thema Multiversen einmal systematisch zusammenzutragen, logisch aufzubereiten – und dann zu hinterfragen, was das noch alles mit Naturwissenschaft zu tun hat. Greenes These: Paralleluniversen können – unter bestimmten Voraussetzungen – »eindeutig zum Forschungsgebiet der Naturwissenschaft gehören«.

Das ist beruhigend, könnten doch einem Nichteingeweihten Zweifel kommen, wenn der Theoretiker uns durch satte neun Varianten von Multiversen führt. Leider nimmt der Grad an Verdaulichkeit mit zunehmender Variantennummer deutlich ab. Einige seien hier aufgeführt.

Brian Greene startet eigentlich ganz unparallel, nämlich in unserem eigenen Universum. Wenn dieses, wie es heute aussieht, räumlich unendlich groß ist, dann muss alles, was hier und jetzt der Fall ist, im Prinzip auch woanders nochmals existieren, sogar unendlich oft – sozusagen als Parallelwelten innerhalb unseres Universums. Das klingt etwas absurd; aber so sind nun mal die Gesetze der Wahrscheinlichkeit, wenn sie mit dem Unendlichen kollidieren.

Im nächsten Schritt wird es dann schon ernster: Unser heutiges Quasi-Standardmodell des Universums hat zwar eine hyperschnelle (»inflationäre«) Anfangsphase; aber die muss keineswegs einmalig sein. »In weit entfernten Bereichen«, so Greene, »könnte inflationäre Expansion … ein Universum nach dem anderen« hervorbringen. Auch die Stringtheorie, die alle Naturkräfte in einem Teilchenphysikmodell vereinen soll, hat ihr Multikosmos-Szenario. Nur nennt sich dieses »Branwelt«. In einem abstrakten höherdimensionalen Raum schweben verschiedene Universen wie Brotscheiben herum und kollidieren auch mal miteinander. Das klingt schon heftig; aber der Urknall würde gerade zu einem Zusammenstoß zweier Branwelten passen. Alternativ verweisen Stringtheoretiker dreist auf 10^{500} mögliche Varianten unterschiedlicher Universen, die sie sich in einer grandiosen »Landschaft« wie dem Alpenvorland vorstellen. Demnach hausen wir mit unserer Welt in einem Seitental.

Natürlich darf auch der Urvater dieser Diskussion nicht fehlen: Hugh Everett III. Der amerikanische Theoretiker postulierte 1957, dass wegen der Gesetze der Quantenmechanik bei jeder indivi-

duellen Messung nicht ein bestimmter unter allen überlagerten Zuständen eines Systems realisiert werde, sondern alle – jede Realisierung in einer anderen Welt. Ununterbrochen würden so neue Welten hervorgebracht – eine ziemlich opulente Weise, sich aus dem Problem des »Kollaps der Wellenfunktion« herauszuwinden. Die ist zwar logisch konsistent, will aber dennoch keinem so richtig schmecken, denn die These ist nicht falsifizierbar und führt daher nicht wirklich weiter.

Nein, Brian Greene will den Leser nicht von irgendetwas überzeugen. Aber die Indizien würden sich seiner Meinung nach doch häufen, treibe man nur die Mathematik an ihre Extreme. Das wirft die erwähnte Frage auf, was das noch mit Naturwissenschaft zu tun hat, deren Kredo und Basis schließlich Beobachtungen und Messungen darstellen und nicht sciencefiction-artige Metatheorien. Da hilft auch die Überzeugung nicht, dass »die Mathematik eng mit dem Gewebe der Wirklichkeit verflochten« sei, oder gar die kühne These »Mathematik ist die Wirklichkeit«. Eine experimentelle Überprüfung ist, so gibt auch Greene zu, derzeit nicht möglich, die Chance dafür »könnte sich mit neuen Forschungsvorhaben allerdings deutlich verbessern«.

Das ist das Prinzip Hoffnung, das gerade Kosmologen beflügelt, wenn sie mal wieder ein neues Raumteleskop anschaffen und das scheinbar Unmögliche messen wollen. Brian Greene plädiert dafür, sich nicht auf Ideen zu beschränken, die man »jetzt oder in naher Zukunft« überprüfen könne. Vielmehr zieht er die Grenze bei Einfällen, die niemals Experimenten oder Beobachtungen ausgesetzt werden können.

Insofern hält der Theoretiker bei aller Sympathie für kosmologische Spekulationen die Balance als Naturforscher. Ein tolles Buch des amerikanischen Theoretikers, das einen auch nach der Lektüre noch lange nicht in Ruhe lässt.

Reinhard Breuer
Der Autor ist Astrophysiker, Editor-at-large bei »Spektrum der Wissenschaft« und Bewohner dieses Universums.

Paul Krugman
Vergesst die Krise!
Warum wir jetzt Geld ausgeben müssen
Aus dem Englischen von Jürgen Neubauer.
Campus, Frankfurt am Main 2012. 272 S., € 24,99

WIRTSCHAFTSWISSENSCHAFT

Keynes für Anfänger

Ein prominenter Ökonom hat für die gegenwärtige Finanzkrise nichts weiter zu bieten als ein altes und ungeeignetes Rezept.

Das kann doch eigentlich nicht wahr sein! Paul Krugman ist ein überaus origineller Mensch, Träger des Wirtschaftsnobelpreises (Spektrum der Wissenschaft 12/2008, S. 18) und wichtiger politischer Kolumnist in den USA, bekannt dafür, gern querzudenken und dicht an der Aktualität zu arbeiten. Und der hat in einem ganzen Buch zu einem höchst aktuellen Thema nicht mehr zu sagen als den einen Satz, der schon auf dem Umschlag steht? Doch, es ist wahr. Wer eine fundierte oder zumindest eine interessante Meinung zur aktuellen europäischen Staatsschuldenkrise erwartet, wird aus zwei Gründen enttäuscht: Krugman bezieht sich fast ausschließlich auf die aktuelle Wachstums-

Sabine Paul

PaläoPower. Das Wissen der Evolution nutzen für Ernährung, Gesundheit und Genuss

C.H.Beck, München 2012. 301 S., € 12,95

»Bewegt euch viel an der frischen Luft und esst wie eure Vorfahren aus der Altsteinzeit.« Diese These vertritt die promovierte Molekular- und Evolutionsbiologin Sabine Paul in dem von ihr gegründeten »Paläopower-Institut für evolutionäre Strategien« in Frankfurt am Main – und in diesem handlichen Ratgeberbuch, leicht verständlich und mitunter zu stark vereinfacht. Die Produkte der modernen, intensivierten Landwirtschaft könnten uns nicht das ausgewogene Nahrungsspektrum bieten, das unser Organismus von seiner Evolutionsgeschichte her benötigt. Fehlernährung sei eine Wurzel vieler Zivilisationsleiden, von Diabetes und Übergewicht bis hin zu kindlichen Lernstörungen. Neu ist das meiste nicht; immerhin waren mir einzelne Zusammenhänge nicht bekannt. Aber Paul hätte berücksichtigen sollen, dass sich die Menschen seit der neolithischen Revolution auch genetisch verändert haben. So vertragen die meisten Europäer heute Milchprodukte und Getreide. ADELHEID STAHNKE

Mary Roach

Die fabelhafte Welt der Leichen

Aus dem Englischen von Michaela Grabinger. riva, München 2012. 352 S., € 19,99

So unbekümmert nassforsch wie der (auf einen Film anspielende) Titel ist das gesamte Buch. Mary Roach erzählt in munterem Plauderton, was für fantastische Dinge man mit Leichen anstellen kann, um Wissenschaft und Technik, oder was sich dafür ausgibt, voranzubringen. Den Einwand, derlei Tun sei »respektlos« – pietätlos wäre wohl treffender –, lässt sie nicht gelten. Schließlich könne es Toten, die nichts mehr spüren, egal sein, was mit ihnen geschieht. Warum sollten sie sich also nicht noch nützlich machen? Es mag ja sein, dass die Crashtests, deren Ergebnisse die Journalistin mit makabrer Lust am Schaurigen beschreibt, sogar helfen, Menschenleben zu retten. Aber man kann auch etwas dezenter darüber berichten. Einen morbiden Voyeurismus zu befriedigen, scheint jedoch verkaufsträchtig zu sein. Warum sonst hat der Verlag das bereits 2005 bei dva erschienene Buch jetzt neu herausgebracht? GERHARD TRAGESER

Adam Hart-Davis

Das Buch der Zeit

Aus dem Englischen von Michael Haupt und Anna Schleitzer. Primus, Darmstadt 2012. 256 S.,€ 29,90

Ein Buch über ein wahrhaft alltägliches und dennoch außerordentlich komplexes Phänomen: die Zeit. Adam Hart-Davis lässt dazu Vertreter diverser Epochen und Kulturen ebenso zu Wort kommen wie Wissenschaftler heutiger Disziplinen. Gibt es etwas anderes als die Gegenwart, und was geschähe mit der Zeit, wenn man sich mit annähernder Lichtgeschwindigkeit bewegen würde? Mit Fragen wie diesen und vielen unterhaltsamen Beispielen versteht es der Autor, die vorgestellten Konzepte aufs Anschaulichste zu erläutern. Die mit Liebe zum Detail gestalteten Illustrationen und prägnanten Grafiken tragen dazu ebenso bei wie der eingängige Erzählstil. Ohne zu sehr in Einzelheiten abzudriften, präsentiert Davis ein umfassendes und kurzweiliges Buch, nach dessen Lektüre man das Verstreichen der Zeit wahrscheinlich um einiges bewusster wahrnehmen wird. ARNE BAUDACH

Henning Aubel (Hg.)

Unser Technikerbe. 350 Denkmäler und Zeugen deutscher Technikkultur

Bucher, München 2012. 284 S., € 29,95

Was versteht man unter »Technikerbe«? Na klar: die Zeche Zollverein, ein eindrucksvolles und ansehnliches Denkmal einer ehemals bedeutenden Technik, die sich überlebt hat. Eine Linsenschleiferei, ein Textilmuseum – es gibt erstaunlich viele ehemals berühmte Firmen, deren Anlagen nach der Insolvenz zum Museum umfunktioniert wurden. Das Deutsche Museum findet zu Recht mehrseitige Erwähnung. Aber noch in Betrieb befindliche Denkmäler? Die Wuppertaler Schwebebahn – na gut, alt ist sie ja. Der Mannheimer Wasserturm? Die Schwarzenbachtalsperre? Die Kochertalbrücke? Ein bisschen Gewalt haben die Autoren bei dieser Zusammenstellung schon angewandt, um auf die 350 Stück zu kommen. Entsprechend karg geraten die Erläuterungen zu jedem einzelnen Objekt. Aber für einen Ausflug mit technikbegeisterten Kindern ist das Buch ein guter Reiseführer. CHRISTOPH PÖPPE

schwäche in den USA und nur ganz am Rande auf die Krise in der Europäischen Währungsunion; vor allem aber sind die Kerninhalte alles andere als neu.

Der Autor verficht die These von John Maynard Keynes (1883–1946), dass in Situationen wie der gegenwärtigen in den Vereinigten Staaten eine entschiedene Steigerung der Staatsausgaben geboten ist. Die Idee ist allgemein bekannt und im Prinzip so simpel, wie sie klingt: Wenn, wie momentan, die eigene Konjunktur lahmt und auch die internationale Wirtschaft nicht so brummt, dass sie reichlich inländische Produkte abnimmt, soll der Staat als Nachfrager einspringen und schuldenfinanziert die Konjunktur ankurbeln. Nach der keynesianischen Theorie wird mit dieser Initialzündung die Sache zum Selbstläufer: Es entstehen Arbeitsplätze, und die Steuereinnahmen steigen, so dass der Staat seine Schulden nach kurzer Zeit wieder zurückzahlen könnte (wenn er wollte; aber ob er sollte, das gehört nicht so zwingend zur Theorie). Wenn er dabei sogar sinnvolle Güter und Dienstleistungen nachfragt, etwa Investitionen in Infrastruktur oder Bildung, lohnt sich das Ganze doppelt, weil das die Leistungsfähigkeit der Wirtschaft erhöht und dadurch zusätzlicher Wohlstand entsteht. Schlägt das Experiment fehl und der Konjunkturmotor springt nicht richtig an, war der Impuls wohl nicht stark genug. Genau so hat Keynes es dargestellt, so steht es in den Lehrbüchern und war schon zigmal in den Zeitungen zu lesen. Und genau dieser Argumentation folgt Krugman in dem Buch.

Der Gedanke ist in bestimmten wirtschaftlichen Konstellationen – wie in der weltweiten Rezession 2008/09 – genau richtig und sollte auch meiner Meinung nach häufiger erwogen und umgesetzt werden. Allerdings gibt es Situationen, in denen keynesianische Ausgabenpolitik völlig verkehrt oder gar unmöglich ist. Krugman deutet selbst ein Beispiel an, nämlich Griechenland, das zur Zeit gar keine Schulden mehr aufnehmen kann, weil diesem Staat niemand mehr zu vernünftigen Zinsen Geld leiht. Auch in Krugmans Denken gibt es also Grenzen einer keynesianischen Ausgabenpolitik. Es wäre interessant gewesen, diese Grenzen näher beschrieben zu bekommen, aber das leistet das Buch nicht.

Krugman vereinfacht die Dinge so weit, dass es langweilig wird – schlimm genug; aber manchmal kommen dabei sogar Aussagen heraus, die er hoffentlich nicht so gemeint hat. So kann man einige Passagen des Buchs als Aufforderung verstehen, den Folgen der übermäßigen Kreditvergabe in den Jahren bis 2008 und der daraus entstandenen Immobilienblase wiederum mit kreditfinanzierten Staatsausgaben zu begegnen – nach dem Motto »Der Aufschwung in der Blasenökonomie war doch so schön, lasst uns eine neue aufpusten«. Den Einwand, dass es nicht

ANZEIGE

Unabhängige
Deutsche Universitätszeitung
Wissenschaft weiterdenken

Holen Sie sich alle wichtigen Infos aus Hochschule und Wissenschaft:

duz.de
duz-wissenschaftskarriere.de

Hintergrundinfos · Nachrichten · Empfehlungen und die besten Jobs
für Nachwuchswissenschaftler, Fach- und Führungskräfte aus Hochschule und Wissenschaft

langfristig gut gehen kann, einfach immer noch mehr Staatskredite aufzunehmen, wischt er mit dem Hinweis vom Tisch, das sei nur eine Moralfabel von verhärmten Spaßbremsen, die zur Selbstkasteiung neigen, wenn es ihnen mal gut gegangen ist. Als Prototyp nennt er hier mehrfach Wolfgang Schäuble. Die Beispiele Griechenland und Spanien zeigen jedoch sehr deutlich, dass man ein bisschen differenzierter an die Sache herangehen sollte.

Um diese Theorie und den Appell zum Geldausgeben herum erzählt Krugman vor allem, wie es zu der Rezession in den Vereinigten Staaten kam: eine Mischung von amerikanischer Geschichtsschreibung und Generalabrechnung mit den wirtschaftlichen Autoritäten, die bisweilen hart an Verschwörungstheorien grenzt. Dennoch finden sich hier die interessantesten Passagen. Krugman macht vor allem die fortschreitende Deregulierung des US-amerikanischen Bankensystems für die Hauspreisblase und den damit verbundenen Zusammenbruch der Lehman-Bank verantwortlich. Die Lockerung der Regeln eröffnete nämlich neue Geschäftsmöglichkeiten, welche die »Renditeerwartungen« – man könnte sie auch einfach als »Gier« bezeichnen – von Bankern und Anlegern anfachten. Da höhere Rendite aber immer mit höherem Risiko verbunden ist, wurde das Bankgeschäft weltweit immer mehr zum Tanz auf dem Vulkan. Auch wenn es vielleicht noch weitere Ursachen für die weltweite Rezession 2008/09 gibt: So auf den Punkt gebracht liest man die Mitschuld der Politik und der Lobbyarbeit von Deregulierungsbefürwortern selten. Hier legt Krugman den Finger in eine ziemlich hässliche Wunde.

Und wie liest sich der »Weckruf des Wirtschaftsnobelpreisträgers«, wie das Buch auf der Titelseite angepriesen wird? Der Stil ist irritierend. Krugman spricht völlig ironiefrei über die »Vertreter der richtigen Lösung«, die von den »Vertretern der falschen Lösungen« bekämpft wurden. So einfach ist für ihn die Aufteilung der Menschheit. Auch Weltbank und Internationaler Währungsfonds, die Notenbanken und die allermeisten Professoren-Kollegen sind nach Ansicht von Krugman zu dumm oder korrumpiert, um die Zusammenhänge zu sehen. Leider hat der Autor offenbar auch von seinen Lesern keine sehr hohe Meinung. Jedenfalls glaubt er, alles im Ton der »Sendung mit der Maus« erklären zu müssen, und wiederholt seine Kernaussagen ständig.

Vielleicht sollte man in dem Buch nicht eine rationale und fundierte Argumentation suchen, sondern es einfach als politisches Plädoyer verstehen. Als Rede eines Politikers, der etwas geschwätzig für die Erhöhung der Staatsausgaben wirbt, ist es gar nicht so schlecht. Polemik, scharfe Schüsse gegen die Gegner, nette Anekdoten, bunte Metaphern, all das wird geboten, nicht aber eine ernst gemeinte, differenzierte Analyse oder gar eine halbwegs wissenschaftliche Auseinandersetzung mit dem Für und Wider der Theorie.

Hiltrud Nehls

Die Rezensentin ist promovierte Wirtschaftswissenschaftlerin und arbeitet bei der NRW.Bank, der Förderbank des Landes Nordrhein-Westfalen, als Länderrisiko-Analystin.

Steven S. Pinker

Gewalt

Eine neue Geschichte der Menschheit

Aus dem Englischen von Sebastian Vogel. S. Fischer, Frankfurt am Main 2011. 1211 Seiten, € 26,80

PSYCHOLOGIE

Wir leben in einer Idylle – und merken es nicht

Nur eine Verzerrung unserer Wahrnehmung hindert uns zu erkennen, dass es uns in Bezug auf Mord und Totschlag besser geht als jemals zuvor.

Bei der Allgegenwart von Terror, Folter, Mord und Krieg in den Medien mag man die Hauptthese dieses Buchs kaum glauben: Steven Pinker, Psychologe an der Harvard University und bisher vor allem mit Büchern zur Sprachforschung bekanntgeworden (Spektrum der Wissenschaft 4/1998, S. 122, 5/1999, S. 150, und 2/2003, S. 91), behauptet, dass wir heute in der friedlichsten Epoche seit Menschengedenken leben und die Wahrscheinlichkeit, durch einen Gewaltakt zu sterben, so gering ist wie nie zuvor. Folter oder Sklaverei sind in vielen Staaten offiziell abgeschafft, Alltagsgewalt ist weit gehend aus der Öffentlichkeit verschwunden, und ihre Ausübung wird im Allgemeinen geächtet.

Pinker hat Ergebnisse aus den verschiedensten Disziplinen zusammengetragen, darunter Geschichts- und Sozialwissenschaften, Evolutionsbiologie, Kriminologie, Psychologie und Philosophie. Sein Gewaltbegriff ist, wie heute üblich, denkbar weit und schließt Mord, Körperverletzung, Diskriminierung und die subtile häusliche Gewalt ebenso ein wie Kriege, Terrorismus, Genozid, Sklaverei und Folter. Seine historischen Erläuterungen beziehen sich auf die unterschiedlichen Formen von Gewalt ebenso wie auf deren Wahrnehmung und Bewertung in Moral, Kunst und Alltag.

Nach der staatstheoretischen Idee, die der englische Philosoph Thomas Hobbes (1588–1679) in seinem Werk

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

»Leviathan« darlegte, zügeln erst Autorität, Gesetze und Herrschaft die natürliche Gewaltbereitschaft des Menschen. An die Stelle dieser drei alten Kräfte setzt Pinker vier neue: Vertrauen in die Macht des demokratischen Staates, Menschenrechte, Kapitalismus und die Verbreitung von Wissen durch Buchdruck und Internet.

Neben den historischen Zusammenhängen untersucht Pinker auch die biologischen und psychologischen Prozesse der menschlichen Aggression. Um seine These von der allgemeinen Abnahme der Gewalt zu belegen, vergleicht der Autor Opferzahlen aus verschiedenen Epochen miteinander. Ausführlich und gut verständlich legt er die Geschichte der Gewalt ebenso dar wie die ideologischen und politischen Hintergründe der jeweiligen Ära, von unseren tierischen Vorfahren bis zum aktuellen Tagesgeschehen.

Insgesamt bestätigen die Ergebnisse Pinkers These für die letzten Jahrhunderte. So ist etwa die Anzahl der Kriegstoten, gemessen an der jeweiligen Gesamtbevölkerung, stark gesunken, ebenso wie die allgemeine Mordrate oder die Anzahl der erfolgreichen Terroranschläge mit Todesopfern.

Eine derartig umfassende und interdisziplinäre Betrachtung des Phänomens Gewalt bringt Probleme mit sich. Die Auswahl der Quellen ist schwierig; das Buch erweckt vor allem bei den historischen Beispielen den Eindruck, der Autor habe sich zu Lasten der Friedensepochen auf die gewalttätigen Phasen konzentriert. Zahlen werden umso unzuverlässiger, je weiter man in der Vergangenheit zurückblickt. So gehen bereits die Schätzungen für die Opfer der Hexenverfolgung weit auseinander, und historisch-literarischen Quellen wie der Ilias oder der Bibel ist eigentlich kaum noch zu trauen.

Ebenso wie die Zahlen schwanken auch die Begrifflichkeiten. Die Definition zentraler Termini wie Gewalt, Mord oder Krieg leistet Pinker nicht selbst, sondern übernimmt sie aus der jeweiligen Quelle.

In seiner Darstellung konzentriert sich der Autor auffällig, aber nicht unerwartet, auf die USA, so als wolle er die spezielle Situation dort erklären. Dabei spart er nicht mit Kritik am System seines Landes. Auch bei den historischen Vergleichen stellt er gerne Europa und die USA einander gegenüber.

Philosophisch folgt er einigen sehr abendländisch geprägten Annahmen: Die Kultur entwickelt sich grundsätzlich zum Besseren, alle Gesellschaften sind im Prinzip miteinander vergleichbar. Wertesysteme, Staatsphilosophien oder Moralkodizes, die nicht einem christlich-abendländischen Hintergrund entspringen, behandelt er nur am Rande.

Alles in allem gelingt Pinker die umfassende Betrachtung eines extrem schwierigen Themas in seiner ganzen Tiefe. Er präsentiert eine große Materialfülle, ohne jedoch die wissenschaftliche Distanz und den moralischen Blick zu verlieren. Manchmal drängt sich eine naturwissenschaftlich-mathematische Betrachtungsweise zu sehr in den Vordergrund.

Ein faszinierendes und spannendes Buch, das zum Nachdenken und Diskutieren einlädt wie kaum ein anderes.

Robin Gerst

Der Rezensent ist Archäologe und forscht derzeit über Kriege in der Vorgeschichte; er lebt in Hannover.

ANZEIGE

Ist Schrödingers Katze ein Quantenobjekt?

Ist sie nun tot oder lebendig – oder gar beides? Das Thema beschäftigt Forscher schon seit über 70 Jahren. Dahinter verbirgt sich die Frage, ob die Quantenphysik auch für die makroskopische Welt gilt. Neue Experimente mit Systemen großer Masse liefern inzwischen Hinweise zur Klärung dieses Rätsels.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / DANIELA LEITNER

ROBERT COX

Komplexe Ökosysteme

Das Zusammenspiel zwischen Organismen und ihrer Umwelt wird noch viel zu wenig verstanden. Ökologen entwerfen trickreiche Eingriffe, etwa um die Bedeutung großer Säugetiere für einen Lebensraum zu ergründen.

MATTHEW LANE

Warum Luft anhalten schwer ist

Der Kohlendioxid- oder Sauerstoffgehalt im Blut bestimmt nicht allein, wie schnell ein Taucher wieder nach Luft schnappen muss. Vor allem ein vom Zwerchfell ausgesendetes Signal ist für das Zeitlimit maßgeblich.

Die Prostatakrebs-Debatte

Hunderttausende Männer leiden nach unnötigen Behandlungen an massiven Nebenwirkungen: Schadet die Früherkennung hier mehr, als sie nutzt? Der Mediziner Marc B. Garnick spricht sich dafür aus, bei der Diagnose »Prostatakrebs« nicht sofort zu therapieren, sondern erst einmal abzuwarten.

Problematische Vielfalt

Die klassische Familie hat durch neue Formen des Zusammenlebens Konkurrenz bekommen. Sozial- und Familienpolitik orientieren sich aber nach wie vor an der traditionellen Institution der Ehe. Gerade hinsichtlich der in Kindheit und Alter anfallenden Betreuungsaufgaben wächst der Handlungsbedarf.

NEWSLETTER

Möchten Sie regelmäßig über die Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?

Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:
www.spektrum.com/newsletter

DIE VORTEILE EINES ABONNEMENTS

So vielfältig wie unser Magazin!

1 Zwölf Ausgaben zum Preis von nur € 84,– inkl. Versand Inland (statt € 94,80 im Einzelkauf); für Schüler, Studenten und Azubis auf Nachweis sogar nur € 69,90

2 2 in 1: Sie erhalten nicht nur die Printausgabe, sondern können auch schon drei Tage vor dem Erstverkaufstag auf die Digitalausgabe zugreifen!

3 Kostenloser Zugriff auf das Onlineheftarchiv von **Spektrum der Wissenschaft** mit fast 9000 Artikeln

4 Bonusartikel und Gratisdownloads ausgesuchter Sonderhefte im Internet

5 Verbilligter Erwerb des Produkts des Monats

Produkt im September

Mikroskop »Bresser Visiomar«

6 **Zusätzlich für Ihre Abobestellung erhalten Sie ein Präsent Ihrer Wahl!**

Weitere Präsente finden Sie im Internet ...

Der **loopshopper L von Reisenthel** verbindet Eleganz beim Einkaufen mit viel Funktion: Zwei äußere Stecktaschen sowie eine innere mit Reißverschluss. Der Korb ist auf Grund der gepolsterten Aluminiumgriffe sicher und bequem zu tragen. Fassungsvermögen: 25 l

Die **DVD »Das Wunder des Lebens«** von Lennart Nilsson dokumentiert die abenteuerliche Entstehung eines Menschen. In bis zu 2000-facher Vergrößerung werden die dramatischen Abschnitte der Entstehung bis hin zur Geburt eines Babys gezeigt. Zirka 45 Minuten Laufzeit

»Das kleine Buch der Stringtheorie«
Die Stringtheorie gilt als eine »Theorie für alles«, mit der sich sämtliche Grundkräfte der Natur beschreiben lassen. Man erhofft sich von ihr die Formulierung einer einheitlichen Theorie für Schwerkraft und Quantenmechanik.

Dieses und zusätzliche Aboangebote wie **Geschenkabo**, **Miniabo** oder **Leser-werben-Leser-Abos** finden Sie unter:

www.spektrum.de/abo

Spektrum DER WISSENSCHAFT
WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

online: spektrum.de/abo
E-Mail: service@spektrum.com
Tel.: +49 6221 9126-743
Fax: +49 6221 9126-751

AcademiaNet

Das Rechercheportal für
herausragende Wissenschaftlerinnen

AcademiaNet ist ein einzigartiger Service für Entscheidungsträger aus Wissenschaft und Industrie, ebenso wie für Journalisten und Veranstalter von Tagungen und Kongressen. Hier finden Sie hochqualifizierte Akademikerinnen, die neben ihren hervorragenden fachlichen Qualifikationen auch noch Führungserfahrung und Managementfähigkeiten vorweisen können.

AcademiaNet, das europäische Rechercheportal für herausragende Wissenschaftlerinnen bietet:

- Profile hochqualifizierter Akademikerinnen aller Fachrichtungen – ausgewählt von Vertretern renommierter Wissenschaftsorganisationen und Industrieverbänden
- Individuelle Suchmöglichkeiten nach Fachrichtungen, Arbeitsgebieten und weiteren Kriterien
- Aktuelle redaktionelle Beiträge zum Thema »Frauen in der Wissenschaft«

Robert Bosch Stiftung

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

nature

Eine Initiative der Robert Bosch Stiftung in Zusammenarbeit mit Spektrum der Wissenschaft und der nature publishing group

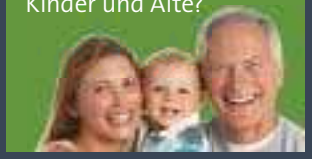
www.academia-net.org

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Gesellschaft 3.0

Auslaufmodell Familie

Wer sorgt 2030 für Kinder und Alte?



OKTOBER 2012

Spektrum DER WISSENSCHAFT 10/12

PROSTATAKREBS
Test zur Früherkennung in der Kritik

SUPERCOMPUTER
Wettrennen zum Exaflops-Rechner

GEHIRN
Einzigartig durch springende Gene

Schrödingers Katze
auf dem Prüfstand

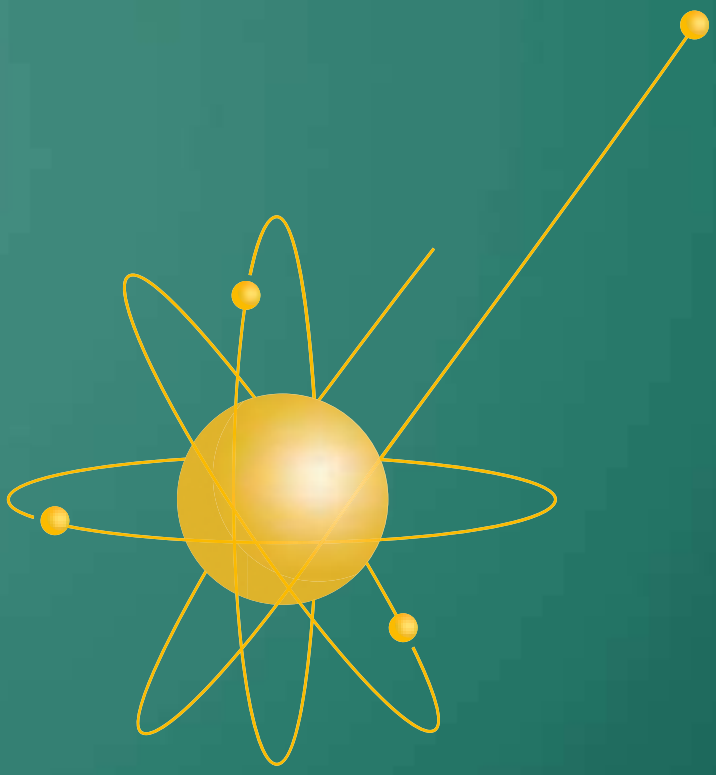
Physiker erforschen Quanteneigenschaften großer Objekte

7,90 € (D/A) · 8,50 € (L) · 14,– sFr.
D6179E

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

www.spektrum.de

S&F



Grow Further.

WORKSHOP FÜR NATURWISSENSCHAFTLER

Verändern Sie die Welt. Zum Besseren. Vom 29. bis 30. November 2012 in Wien.

Entdecken Sie die Bandbreite Ihrer Möglichkeiten. Und die Tragweite Ihres Handelns. Als Teil eines interdisziplinären Teams meistern Sie bei der weltweit führenden Strategieberatung nicht nur vielfältige ökonomische Herausforderungen. Sie übernehmen auch große soziale oder ökologische Verantwortung. Bei diesem Workshop lernen Sie beide Seiten kennen. Nutzen Sie Ihr naturwissenschaftliches Know-how bei einer Fallstudie zu relevanten Zukunftsthemen. Und diskutieren Sie im Stift Heiligenkreuz mit dem Altabt und BCG darüber, wie sich Wirtschaft und Ethik in Einklang bringen lassen. Schließlich sollen Ihre Strategien ebenso wirtschaftlich wie auch gesellschaftlich tragfähig sein. Wir suchen herausragende Universitätsstudierende, Doktoranden und Professionals (w/m) aller naturwissenschaftlichen Fachrichtungen (u. a. Biologie, Chemie, Mathematik, Physik und Medizin). Bitte senden Sie Ihre Unterlagen bis zum 12. Oktober an Mirja Hentschel, E-Mail: nawi-workshop@bcg.com. **Mehr unter nawi-workshop.bcg.de**

BCG

THE BOSTON CONSULTING GROUP

Carsten Könneker
Chefredakteur
koenneker@spektrum.com

Lebendig? Tot? Unsterblich!

Ob sie nun lebt oder nicht, das ist nicht mehr die Frage – als Gedankenexperiment ist Schrödingers Katze ohnehin längst unsterblich. Der österreichische Physiker hatte das berühmte Tier 1935 erschaffen. Es sollte einer missliebigen Interpretation der Quantenmechanik den Garaus machen, die seine Kollegen Max Born, Nils Bohr und Werner Heisenberg wenige Jahre zuvor entwickelt hatten, die so genannte Kopenhagener Deutung. Demnach wird jedes quantenmechanische System vollständig durch seine Wellenfunktion beschrieben. Für ein radioaktives Atom etwa lautet sie $\psi_{\text{Atom}} = c_{\text{nicht zerfallen}} \cdot \psi_{\text{nicht zerfallen}} + c_{\text{zerfallen}} \cdot \psi_{\text{zerfallen}}$. Die Koeffizienten c enthalten dabei die Wahrscheinlichkeiten dafür, dass das Teilchen zu einem bestimmten Zeitpunkt zerfallen ist oder nicht. Die Kopenhagener Interpretation besagt nun: Solange niemand nachschaut, wie es um das Atom bestellt ist, befindet es sich in einem überlagerten Zustand; erst die Messung zwingt das Partikel gewissermaßen zu einer Entscheidung.

Die Vorstellung, dass der Akt des Experiments einen zuvor überlagerten Zustand von Möglichkeiten zur konkreten Wirklichkeit verkürzt, fand Erwin Schrödinger, der Vater der Wellenfunktion, geradezu absurd. Um seine halsstarrigen Kollegen zur Einsicht zu bewegen, ersann er einen fiktiven Versuch, der das quantenmechanische System »radioaktives Atom« an ein makroskopisches System aus der Alltagswelt koppelt – ebenjene berühmte Katze. Durch eine »Höllenmaschine«, so Schrödingers Formulierung, bestehend aus einem Geiger-Zählrohr, einem Hammer und einem »Kölbchen mit Blausäure«, das Ganze in einer von außen nicht einsehbaren Kiste installiert, verknüpfte er das Leben der Katze mit dem Zustand einer radioaktiven Substanz. Sobald ein Atom zerfällt, wird das Gift freigesetzt, und der Vierbeiner segnet das Zeitliche. Anders formuliert: Bis zum ersten Zerfall erfreut sich das Tier bester Gesundheit.

Schrödingers Katze gehorcht in dieser Anordnung der Wellenfunktion $\psi_{\text{Katze}} = c_{\text{lebendig}} \cdot \psi_{\text{lebendig}} + c_{\text{tot}} \cdot \psi_{\text{tot}}$. Das Paradoxe daran: Solange niemand die Kiste öffnet und nachschaut, wie es mit dem Tier steht, ist es laut Kopenhagener Deutung sowohl lebendig als auch tot! Erst der Blick in die Kiste presst das System »Katze« unumkehrbar in einen der beiden Zustände. Und das, so Schrödingers Kritik, spotte ja wohl dem gesunden Menschenverstand. Die Kopenhagener Deutung könne folglich nicht zutreffen, auch nicht für die Mikrophysik.

Hatte Schrödinger Recht? Die meisten Physiker würden dies heute verneinen. Doch noch immer tüfteln sie an dem Problem, wie weit die seltsamen Gesetze der Quantenphysik auch in der Makrowelt gelten. Der 1961 verstorbene Nobelpreisträger würde sich wundern, wie pragmatisch seine Nachfolger dabei vorgehen. So prüfen sie aktuell verschiedene Erklärungen für den rätselhaften Kollaps der Wellenfunktion, und die Systeme, die sie dabei im Labor untersuchen, werden immer größer. Vielleicht ist es Schrödinger zu verdanken, dass gerade österreichische Forscher hierbei eine weltweite Vorreiterrolle einnehmen. Zwei der wichtigsten Vertreter, Markus Aspelmeyer und Markus Arndt von der Universität Wien, berichten ab S. 44 über den aktuellen Frontverlauf zwischen Mikro- und Makro-Quantenphysik.

Eine anregende Lektüre wünscht Ihr

AUTOREN IN DIESEM HEFT

Der PSA-Test kann helfen, ein Prostatakarzinom frühzeitig zu entdecken. Doch allzu oft führt er zu unnötigen Operationen mit erheblichem Nebenwirkungsrisiko, wie der Onkologe **Marc Garnick** auf S. 28 schreibt.

Die Neurologen **Fred H. Gage** (links) und **Alysson R. Muotri** sehen in springenden Genen, die noch im ausgewachsenen Gehirn Mutationen hervorrufen, einen Grund für die Anpassungsfähigkeit unseres Denkorgans (S. 22).

Patchworkfamilie und Singlehaushalt – der Züricher Soziologe **Klaus Haberkern** fragt nach den Konsequenzen neuer Familienformen für die Betreuung von Kindern und Senioren (S. 68).

3 **Editorial**

6 **Leserbriefe/Impressum**

8 **Spektrogramm**
Künstliches Perlmutt • Gewitter durchlöchern Ozonschicht • Frühe Menschen in Südostasien • Muttermilch hemmt Entzündungen • Das Weltall ist monoton • Frühes Insektenfossil gefunden

11 **Bild des Monats**
Türöffner für Krebszellen

12 **Forschung aktuell**

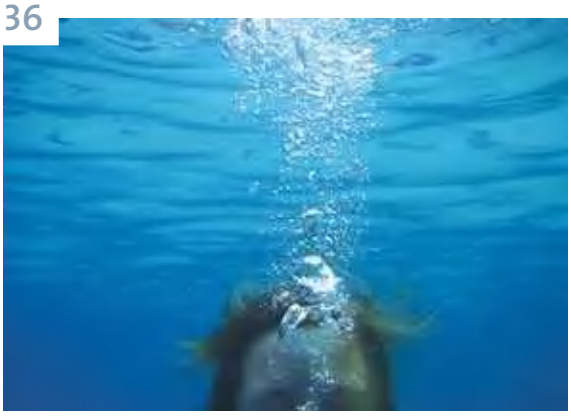
Unerwartet energiereiche Gammablitze
Der Pulsar im Krebsnebel sendet rätselhafte Signale.

Vorgeburtlicher Gentest ohne Risiko
Fötales Genom lässt sich aus Spuren im mütterlichen Blut sequenzieren.

Prionen bei Pilzen
Bei Hefen und Schlauchpilzen haben Prionproteine sinnvolle Funktionen.

SPRINGERS EINWÜRFE
Mit Higgs zum Mars?
Großforschung unter Rechtfertigungsdruck

28

36


60

BIOLOGIE & MEDIZIN

▸ 22 **Was jedes Gehirn einzigartig macht**
Fred H. Gage und Alysson R. Muotri
Springende Gene erzeugen zufällige Mutationen in Hirnzellen und können so deren Funktion ändern.

▸ 28 **Streit um die Prostatakrebs-Früherkennung**
Marc B. Garnick
PSA-Screenings sollen Tumoren frühzeitig aufspüren. Doch sie führen laut Experten zu unnötigen Operationen.

36 **Warum ist Luftanhalten so schwer?**
Michael J. Parkes
Normalerweise hält man es nicht einmal eine Minute ohne Atemholen aus – aber nicht aus Sauerstoffmangel.

PHYSIK & ASTRONOMIE

SCHLICHTING!
56 **Schielt der Mond?**
H. Joachim Schlichting
Die Mondsichel weist stets exakt zur Sonne – sollte man meinen. Manchmal aber nicht! Was steckt dahinter?

INTERVIEW
60 **Der LHC nach Higgs: Die Suche bleibt spannend**
Jüngst wurde am weltgrößten Teilchenbeschleuniger ein neues Elementarteilchen gefunden. Über die Bedeutung des Funds und seine Folgen sprach »Spektrum« mit dem Teilchenphysiker Siegfried Bethke.

MENSCH & KULTUR

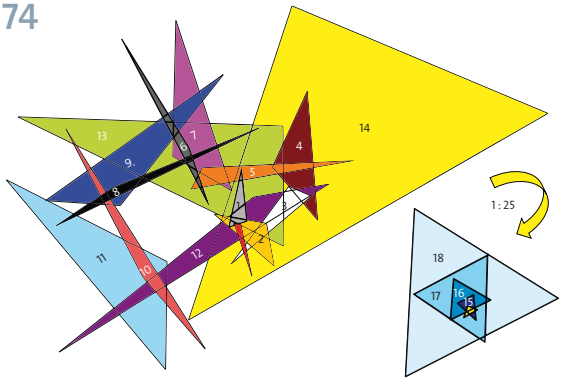
▸ 68 **Vielfalt der Familie: Problem, Herausforderung, Chance**
Klaus Haberkern
Neue Formen des Zusammenlebens stellen die bisherige Sozial- und Familienpolitik in Frage.

44
▶ TITELTHEMA

Schrödingers Katze auf dem Prüfstand

Markus Aspelmeyer und Markus Arndt
Was geschieht mit den Paradoxien der Quantenphysik, wenn man immer ausgedehntere Objekte betrachtet? Neue Experimente mit Systemen großer Masse sollen jetzt helfen, dieses fundamentale Rätsel zu lösen.

74



90

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

74 **Dreiecksbeziehungen**
Grégoire Nicollier
Aus einer schlichten Konstruktionsvorschrift wird ein chaotisches dynamisches System mit höchst überraschenden Eigenschaften.

ERDE & UMWELT

82 **Ökosysteme erforschen**
Robert M. Pringle
Die komplexe innere Dynamik von ökologischen Systemen ist am besten erkennbar, wenn sich einzelne ihrer Bestandteile verändern – durch Naturereignisse oder menschliche Eingriffe.

TECHNIK & COMPUTER

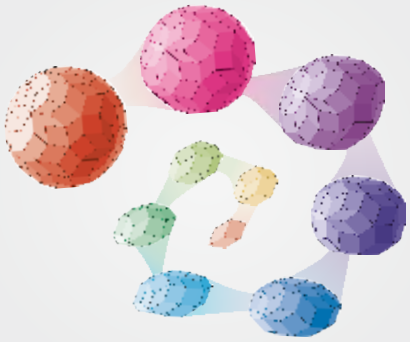
▶ 90 **Neues aus der Supercomputer-Szene**
Hans Günther Kruse
Wenn sich die Leistung der schnellsten Rechner wie geplant bis 2020 verhundertfachen soll, ist vor allem ihr Strombedarf zu senken. Dies und mehr war auf der Internationalen Supercomputer-Konferenz 2012 zu erfahren.

100 **Rezensionen**
M. Crichton und R. Preston: Micro • *E. Balas:* Der Wille zur Freiheit • *F. zu Löwenstein:* Food Crash • *E. Weber:* Das kleine Buch der botanischen Wunder • *P. Wyse Jackson:* Paläontologie für Neugierige • *D. Röhrlich:* Urmeer • *G. L. Legendre:* Pasta und Design

80 **Wissenschaft im Rückblick**
Vom Zwergsaurier zum Hochgeschwindigkeitszug

106 **Vorschau**

Titelmotiv: Spektrum der Wissenschaft / Daniela Leitner
Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet.



GRAFIK: KATSUYA KATO, MIT FRDL. GEN. VON CASPAR SCHWABE; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Projektionen der Einheitswürfel mit den Dimensionen 3 bis 12 in den gewöhnlichen dreidimensionalen Raum.

Hyperkugeln – eine unendliche Geschichte

Bryan Hayes erläuterte, dass eine Hyperkugel mit zunehmender Dimension einen immer kleineren Teil des sie eng umschließenden Würfels einnimmt. (»Ein Abenteuer in n *Dimensionen«, August 2012, S. 52)*

Gerrit Schmitz-Veltin, Bad Dürkheim: Das Lesen des Artikels bereitet großes Vergnügen. Brian Hayes vermittelt sein eigenes Staunen über das Verschwinden einer Kugel in vielen Dimensionen an seine Leser. Ein zusätzliches Staunen hat bei mir folgender Befund ausgelöst: Nimmt man nicht die »Einheitskugel« mit Radius $r = 1$ (Maximum des Volumens bei $n = 5$ Dimensionen), dann müssen die Volumina mit r^n multipliziert werden. Der grundsätzliche Verlauf – erst Anstieg, dann Anschmiegen an die Dimensionsachse mit Volumen null – bleibt erhalten. Aber selbst bei nur geringfügig anderen Radien liegen die Maxima bei anderen Dimensionszahlen. Zum Beispiel für $r = 0{,}9$ bei $n = 4$, für $r = 1{,}1$ bei $n = 7$, für $r = 1{,}2$ bei $n = 8$. Es wäre interessant zu erfahren, wie das vorstellungsmäßig zu verstehen ist.

Antwort der Redaktion: Da gibt es leider nichts zu verstehen. Bei der Wahl $r = 0{,}5$ verschwindet das Maximum sogar komplett (genauer: Es rückt über den linken Rand des Diagramms hinaus). Also läuft die Frage »Warum gerade bei $n = 5$?« auf die Frage nach der Wahl der »natürlichen« Volumeneinheit hinaus – und versinkt damit in den Sümpfen der Willkür. Handfest bleibt der Befund, dass das Verhältnis von Kugel- zu Würfelvolumen mit zunehmender Dimension verschwindend klein wird, und zwar für beliebige Werte von Radius der Kugel und Kantenlänge des Würfels – wenn man nur diese beiden Werte konstant hält.

Eugen Bauhof, Nürnberg: Dass das Volumen der n-dimensionalen Einheitskugel für $n \to \infty$ gegen 0 strebt, hat uns der Autor des Artikels mitgeteilt. Daraus folgt, dass auch der Begrenzungsraum (die »Oberfläche«) der n-dimensionalen Einheitskugel gegen 0 strebt, wenn man die Anzahl der Dimensionen über alle Grenzen wachsen lässt.

Vor etwa zehn Jahren beschäftigte ich mich auch mit diesem Thema und kam zu ähnlichen Betrachtungen wie der Autor. Darüber hinaus addierte ich alle Begrenzungsräume der Einheitskugeln für alle geradzahligen n = 2, 4, 6, 8, ..., ∞. Der Begrenzungsraum der Einheitskugel strebt für $n \to \infty$ gegen 0. Für die unendliche Summe der Begrenzungsräume aller Einheitskugeln ergibt sich der Wert $2\pi e^{\pi}$. Das ist vermutlich auch nur eine Zahlenspielerei. Für die ungeradzahligen Dimensionen ist mir die Addition nicht gelungen. Vielleicht gelingt das einem der Leser.

Oswin Aichholzer, Graz: Hier kurz eine ergänzende Bemerkung zum Verhältnis Kugel zu Würfel. Was »passt«besser: die (Hyper-)Kugel in den (Hyper-)Würfel oder der (Hyper-)Würfel in die (Hyper-)Kugel? In der Ebene nimmt, wie im Artikel erwähnt, ein maximaler Kreis in einem Quadrat ungefähr 78,5 Prozent der

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.)
Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser (Monatshefte), Dr. Gerhard Trageser (Sonderhefte)
Redaktion: Thilo Körkel, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online-Koordinator), Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke, Antje Findeklee (Bild des Monats); E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Editor-at-Large: Dr. Reinhard Breuer
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Referentin des Chefredakteurs: Kirsten Baumbusch
Redaktionsassistenz: Erika Eschwei
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax -751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114
Verlagsleiter: Richard Zinken
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Uschi Loos, Dr. Ilse Tutter.

Leser- und Bestellservice:
Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung:
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 7,90 (D/A) / € 8,50 (L) /sFr. 14,–; im Abonnement € 84,– für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Die Preise beinhalten € 8,40 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 8,40 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e.V. erhalten SdW zum Vorzugspreis.
Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Bereichsleitung Anzeigen: Marianne Dölz; Anzeigenleitung: Patrick Priesmann, Tel. 0211 887-2315, Fax 0211 887 97-2315; verantwortlich für Anzeigen: Christian Herp, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887 2481, Fax 0211 887-2686
Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 33 vom 01.01. 2012.
Gesamtherstellung: L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2012 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
75 Varick Street, New York, NY 10013-1917
Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven Inchcoombe, Vice President, Operations and Administration: Frances Newburg, Vice President, Finance, and Business Development: Michael Florek, Managing Director, Consumer Marketing: Christian Dorbandt, Vice President and Publisher: Bruce Brandfon

Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

PRESSE Fachhandel

Fläche des Quadrats ein. Ein maximales Quadrat in einem Kreis hingegen füllt nur etwa 63,7 Prozent der Fläche des Kreises aus. Ähnlich die Situation in 3-D, auch hier passt die Kugel mit 52,3 Prozent des Würfelvolumens besser als der Würfel mit nur 36,8 Prozent des Kugelvolumens. Das gilt bis zur Dimension 8. Ab dem 9-dimensionalen Raum verhält es sich plötzlich umgekehrt: Nun passt der Hyperwürfel besser in die Hyperkugel. Der Wechsel findet hier bei der gebrochenen Dimension 8,13... statt und zeigt damit ein ähnlich merkwürdiges Verhalten wie das Kugelvolumen selbst.

Ethische Normen nicht allgemein gültig ableitbar

Ludwig Siep diskutierte das Verbot der Patentierung embryonaler Stammzellen durch den Europäischen Gerichtshof. (»Patente auf Leben – ein umstrittenes Thema«, August 2012, S. 28)

Walter Weiss, Kassel: Der Autor stellt in erfreulich nüchterner Weise die rechtliche Problematik dar. Ich möchte zusammenfassen (und ein wenig ergänzen):
(1) Ein Gesetz, das diesen Komplex regeln soll, kann weder aus der Naturwissenschaft hergeleitet werden noch aus – gar nicht existierenden – »naturrechtlichen« Regeln noch auch aus religiösen Überzeugungen. Es muss in unseren westlichen Demokratien als Recht normativ gesetzt werden; die beteiligten Bürger müssen sich also, um es salopp zu sagen, mit allen möglichen persönlichen Argumenten zusammenraufen.
(2) Dabei sollte nicht vergessen werden, dass die Religionen auch nichts anderes als menschliche Erfindungen und Vereinbarungen sind.
(3) Wenn der Autor als vermeintlich mehr oder weniger objektiven Maßstab die Menschenwürde nennt, ist auch diese nichts anderes als eine – sehr wertvolle – menschliche Erfindung.
(4) Also: Ein Gesetz, das regelt, welche menschlichen Zellen ab wann und in welchem Zustand/Zusammenhang rechtlich geschützt werden sollen, kann nur durch das erwähnte »Zusammenraufen« gefunden werden. So ist das ja auch nach langen Geburtswehen mit der Regelung des Schwangerschaftsabbruchs praktiziert worden.
(5) Gerade diese Regelung des Schwangerschaftsabbruchs liefert aber noch ein zusätzliches Argument (das der Autor nur ganz nebenbei erwähnt) und eine zusätzliche Schranke: Ein Gesetz, das die menschlichen Zellen in dem erwähnten Umfang schützen soll, darf natürlich nicht hinter bereits installierte und mit sehr viel Mühe gefundene Regelungen reichen, darf diese also nicht etwa torpedieren – was in den politischen Debatten ständig versucht wird, woraus der Anschein entsteht, fundamental eingestellte Gläubige wollten auf diese Weise die mühsam – im Interesse der Menschenwürde! – gefundenen bereits vorliegende Regelungen wieder aufheben.

Antwort des Autors Prof. Ludwig Siep: Im Allgemeinen bin ich mit Herrn Weiss einverstanden. Allerdings spielen bei den normativen Setzungen vor allem auch die rechtlichen Traditionen und Lernprozesse eine Rolle. Sie spiegeln oft tief greifende kollektive Erfahrungen wider (etwa mit den Totalitarismen des 20. Jahrhunderts). Wenn Normen gemeinschaftlich beschlossen werden, heißt das nicht, dass sie bloße Kompromisse von Meinungen und Interessen sind. Falls es sich um Errungenschaften wie die Grundrechte oder auch die Überzeugungs- und Forschungsfreiheit handelt, kann man sie durchaus als irreversibel bezeichnen.

Errata

»Lithium-Luft-Akku besteht Praxistest«, Spektrogramm, September 2012, S. 9
Das Lösungsmittel für den neuartigen Lithium-Luft-Akku enthält statt Lithiumchlorat das beständigere Lithiumperchlorat.

»Ein Abenteuer in n *Dimensionen«, August 2012, S. 52*
Auf S. 57, Ende des vorletzten Absatzes, muss es heißen: »Das Volumen der n-Kugel ist gleich $2\pi r^2/n$ [nicht $2\pi r^{2/n}$] mal dem Volumen der $(n-2)$-Kugel.« Friedrich Tarczynski aus Gaweinstal (Österreich) hat uns auf den Fehler aufmerksam gemacht.

»Das ikosidodekaedrische Prismatohexakosihekatonikosachoron«, Juni 2012, S. 60
In der Bildunterschrift zum Bild auf S. 62 oben sind bei den beiden letzten der fünf abgebildeten Körper die Namen verwechselt worden. Es muss heißen »das große [nicht das kleine] Rhombenkuboktaeder (4, 6, 8)« (drittletzte Zeile) und »das kleine [nicht das große] Rhombenkuboktaeder (3, 4, 4, 4)« (letzte Zeile). Heinrich Bubeck aus Ravensburg hat den Fehler bemerkt.

»Graphen aus dem Chemielabor«, August 2012, S. 82
Die Cyclodehydrierung von Hexaphenylbenzol erfolgt durch Entzug von Elektronen an einer Anode und nicht, wie es im Artikel heißt, durch Zufuhr von Elektronen an einer Kathode.

FOLGEN SIE UNS IM INTERNET

facebook
www.spektrum.de/facebook

YouTube
www.spektrum.de/youtube

studiVZ
www.spektrum.de/studivz

twitter
www.spektrum.de/twitter

BRIEFE AN DIE REDAKTION

... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf www.spektrum.de/leserbriefe

Spektrum der Wissenschaft
Leserbriefe / Sigrid Spies
Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

Die vollständigen Leserbriefe und Antworten der Autoren finden Sie ebenfalls unter: www.spektrum.de/leserbriefe

CHEMIE

Glanz aus dem Labor

Perlmutt ist ein schillerndes Biomineral, das Weichtiere (Mollusken) auf der Innenseite ihrer Schalen bilden. Zu finden ist es etwa in den Gehäusen von Perlmuscheln und Kreiselschnecken. Da es hart, aber zugleich elastisch ist, verhindert es die Ausbreitung von Rissen in der Schale. Über Jahrhunderte hinweg schmückten Menschen sich und ihre Alltagsgegenstände mit dem irisierenden Material; die Polynesier zahlten gar damit. Einer Forschergruppe um Ullrich Steiner von der University of Cambridge ist es jetzt gelungen, einen ganz ähnlich aufgebauten Stoff künstlich herzustellen.

CAVENDISH LABORATORIES, UNIVERSITY OF CAMBRIDGE

Das künstliche Perlmutt (rechts) schillert so prächtig wie das natürliche (links) und hat auch sonst ähnliche Eigenschaften.

Natürliches Perlmutt besteht aus Kalziumkarbonat und organischer Materie – hauptsächlich Chitin und vermutlich Kollagen. Diese bildet eine Art Netzwerk, eine Matrix. Darin eingebettet liegen mikrometergroße Plättchen aus Kalziumkarbonat. In der Summe entsteht ein Verbundmaterial, das stoß- und bruchfest ist und dank seiner geschuppten Oberfläche das Licht in allen Regenbogenfarben zurückwirft.

Um diese Struktur nachzuahmen, erzeugten die Forscher einen porösen Kunststofffilm auf einem Objektträger. Diesen tauchten sie unter Kohlendioxidatmosphäre in eine Lösung, die Kalziumionen enthielt. Dort entstand auf dem Film eine glasartige (amorphe) Schicht aus Kalziumkarbonat, die in feuchtem Milieu zu dem Mineral Kalzit kristallisierte. Indem die Wissenschaftler diesen Zyklus mehrfach wiederholten, erhielten sie eine Schichtstruktur aus 400 Nanometer dicken Kalzitplättchen und 30 Nanometer starken Kunststoffschichten.

Das künstliche Perlmutt hat ähnliche mechanische Eigenschaften wie das Original aus der Natur und schillert auch genauso. Die Forscher schreiben, dass der Herstellungsprozess keine hohen Temperaturen erfordere, relativ wenig Zeit beanspruche und sich für die Fertigung harter Oberflächenbeschichtungen aus billigen Ausgangsmaterialien eigne.

Nature Communications 3, Artikelnummer 966, 2012

METEOROLOGIE

Gewitter durchlöchern Ozonschicht

Große Gewitterwolken enthalten bis zu mehrere Millionen Tonnen Wasser. Ein Team um James Anderson von der Harvard University hat nun gezeigt, dass sie den Dampf bis in 20 Kilometer Höhe transportieren können – und damit bis in die Ozonschicht hinein. Dabei stützen sich die Wissenschaftler auf Messungen an sommerlichen Gewittern über den USA, die in den zurückliegenden Jahren mit NASA-Forschungsflugzeugen durchgeführt wurden.

Den Forschern zufolge beschleunigt der Wasserdampf den Abbau der Ozonschicht; denn er fördert die Umwandlung von dreiatomigem Ozon in zweiatomigen Luftsauerstoff unter Beteiligung von Chlor- und Bromverbindungen. Typischerweise enthält die ungestörte Stratosphäre etwa 5 ppm (»parts per million«, millionstel Teile) Wasser. Durch Wasserdampfkonvektion in Gewitterwolken könne dieser Wert auf das Drei- bis Vierfache ansteigen, schreiben Anderson und sein Team. Bei derart hohem Wassergehalt setze der Ozonabbau auch in gemäßigten Breiten ein. Infolgedessen gehe die stratosphärische Ozonkonzentration nach einem Gewitter teils um mehr als 20 Prozent zurück.

So entstehen lokale Ozonlöcher, die wohl bis zu 100 Kilometer Durchmesser erreichen. Weil sie vermehrt solare UV-Strahlung durchlassen, steigt am Boden das Risiko von Hautkrebs. Die Forscher warnen davor, dass sich lokale Ozonlöcher infolge des Klimawandels künftig häufiger bilden werden, solange der Chlor- und Bromgehalt in der Atmosphäre nicht wieder auf vorindustrielles Niveau abgesunken ist. Denn die steigenden Temperaturen sorgen für zunehmende Verdunstung und mehr Dampf in der Atmosphäre. Steigt die erhitzte, feuchte Luft bei Gewittern auf, kondensiert das Wasser unter Wärmeabgabe. Das verstärkt den Aufwärtssog und befördert zusätzlich Dampf in die Stratosphäre.

DREAMSTIME / QUEST 39

Gewitterwolken können sich zu bedrohlichen Ungetümen auftürmen. Ihr Einfluss reicht bis in die Stratosphäre hinauf.

Science 337, S. 835–839, 2012

ANTHROPOLOGIE

Moderner Mensch kam schon früh nach Südostasien

Vor drei Jahren waren Archäologen in der Höhle Tam Pa Ling in Laos bereits auf Bruchstücke eines menschlichen Schädels gestoßen. Nun haben Forscher um Fabrice Demeter von der Université Paul Sabatier in Toulouse (Frankreich) nachgewiesen, dass die Knochen, die sie auf rund 63 000 Jahre datierten, von einem modernen *Homo sapiens* stammen. Die Altersbestimmung erfolgte mit der Uran-Thorium-Methode am gut erhaltenen Stirnbein.

Zusätzlich zum Schädel selbst datierten die Forscher auch die umgebenden Bodenschichten mit Hilfe von Isotopen- und Lumineszenzanalysen. Dabei kamen sie auf ein Alter zwischen 46 000 und 51 000 Jahren. Die Wissenschaftler vermuten, dass der Schädel ursprünglich vor dem Höhleneingang lag und erst später ins Innere gespült wurde.

Die Knochenstücke wären somit die ältesten Fossilien eines eindeutig modernen *Homo sapiens* in Südostasien. Sie würden bestätigen, worauf genetische Analysen schon länger hindeuten: dass nämlich die ersten anatomisch modernen Menschen schon vor mehr als 60 000 Jahren nach Südostasien einwanderten.

PNAS 10.1073/pnas.1208104109, 2012

LAURA SHACKELFORD, UNIVERSITY OF ILLINOIS

Obwohl schon zehntausende Jahre alt, zeigen die Schädelstücke aus der Tam-Pa-Ling-Höhle eindeutig Merkmale von anatomisch modernen Menschen; so haben sie keinen Überaugenwulst.

MEDIZIN

Muttermilch hemmt Entzündungen

Immunzellen in der Muttermilch dämpfen Entzündungsreaktionen bei den Säuglingen. Das haben Yihong Wan von der University of Texas und ihre Kollegen herausgefunden. Eine entscheidende Rolle spielt hierbei das Rezeptorprotein VLDLR, wie die Forscher in Experimenten mit Mäusen feststellten.

Wurden Mäusejunge von Weibchen gesäugt, die kein funktionierendes Rezeptorprotein herstellen konnten, dann enthielt ihr Blut eine bis zu vierfach erhöhte Menge an entzündungsfördernden Substanzen. Einer dieser Stoffe, der »plättchenaktivierende Faktor« (PAT), wird von dem Enzym PAFAH abgebaut. Neugeborene Mäuse können das Enzym noch nicht selbst produzieren und bekommen es über die Muttermilch – in Form von mütterlichen Immunzellen, die PAFAH herstellen. Ohne funktionierende VLDLR-Proteine produzieren diese Abwehrzellen in der Milch das Enzym jedoch nicht. Die damit gesäugten Mäusejungen wogen weniger als ihre Altersgenossen, litten unter Blutarmut und Haarausfall.

FOTOLIA / ANDREAS KOCH

Muttermilch ist nahrhaft und fördert die Abwehrkräfte. Zudem dämpft sie Entzündungsreaktionen im Körper der Babys, zumindest bei Mäusen.

Wan und ihr Team vermuten, dass aktivierte VLDLR-Proteine über mehrere Zwischenschritte die Produktion des Enzyms PAFAH ankurbeln. Dies würde erklären, warum Mäuseweibchen mit defektem VLDLR-Gen kein PAFAH an ihre Jungen weitergeben können. Da sich Mutationen in diesem Gen bei Nagetieren und Menschen vielfach ähnlich auswirken, glauben die Forscher, dass ihre Befunde zumindest teilweise auf den Menschen übertragbar sind.

Nature Communications 3, Artikelnummer 1008, 2012

MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de

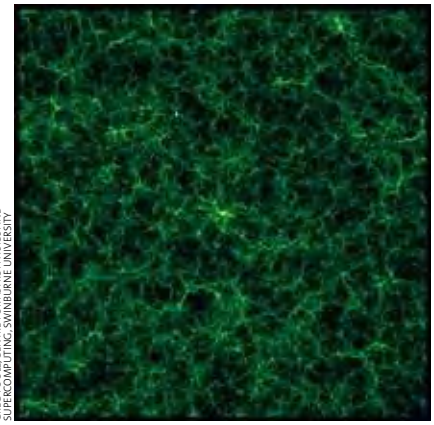
Aktuelle Spektrogramme finden Sie täglich unter

www.**spektrum.de**/spektrogramm

KOSMOLOGIE

Monotones Weltall

Das Universum ist in großem Maßstab betrachtet glatt und strukturlos. Zu diesem Ergebnis kommen Astronomen um Morag Scrimgeour von der University of Western Australia in Perth. Sie bestätigen damit, dass die gängigen Theorien der Kosmologie in dieser Hinsicht von korrekten Voraussetzungen ausgehen.



GREG POOLE, CENTRE FOR ASTROPHYSICS AND SUPERCOMPUTING, SWINBURNE UNIVERSITY

Das Universum in großem Maßstab: Ausschnitt aus einer Simulation.

Die Forscher untersuchten die großräumige Verteilung von Galaxien. Dabei stützten sie sich auf Daten des WiggleZ-Surveys, einer spektroskopischen Himmelsdurchmusterung, bei der etwa 240 000 Galaxien vermessen worden waren. Das Ergebnis der Analyse: Auf Größenskalen oberhalb von etwa 350 Millionen Lichtjahren ist die Materie annähernd gleich verteilt. Das stimmt mit den Annahmen überein, auf denen das Standardmodell der Kosmologie beruht. Ihnen zufolge ist das Universum im Großen und Ganzen homogen und isotrop, also überall und in jeder Richtung gleich beschaffen.

Für kleinere Maßstäbe gilt das offenkundig nicht: Lokale Materieverdichtungen bringen Galaxien, Sterne und Planeten hervor, die Galaxien schließen sich zu Haufen zusammen und diese wiederum zu Superhaufen. Die Superhaufen sind aber die größten erkennbaren Strukturen im All; noch größere scheint es nicht zu geben.

Damit widersprechen die Forscher theoretischen Ansätzen, wonach das Universum eine fraktale Materieverteilung aufweist, also die selbstähnliche Fortsetzung von Strukturen auf immer größeren Längenskalen. Träfe dies zu, so hätte das große Auswirkungen auf die Kosmologie – zum Beispiel müsste man die beschleunigte Ausdehnung des Universums dann mit anderen Modellen erklären.

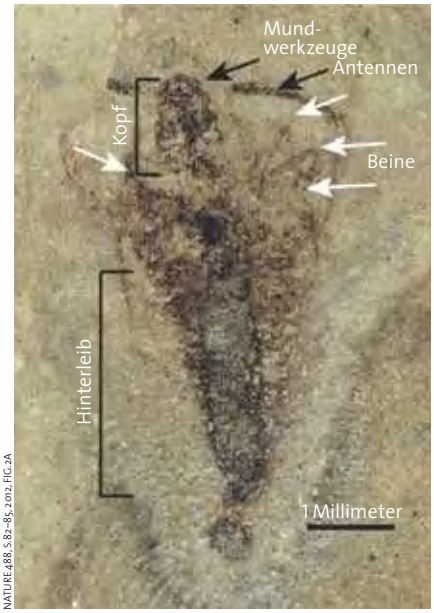
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 425, S. 116–134, 2012

BIOLOGIE

Frühes Fossil beleuchtet die Evolution der Insekten

In einem belgischen Steinbruch haben Wissenschaftler möglicherweise das bislang älteste geflügelte Insekt gefunden. Wie die Forscher um Romain Garrouste vom Muséum National d'Histoire Naturelle in Paris vermuten, entspricht das wenige Millimeter lange Fossil von *Strudiella devonica* dem Nymphenstadium eines fliegenden Kerbtiers, das vor rund 370 Millionen Jahren lebte. Der Fund fällt mitten in die »Hexapoden-Lücke«, einen Zeitraum ohne nennenswerte Insektenfossilien, in dem sich wahrscheinlich die Tierwelt der Karbonwälder entwickelte. Die Entdeckung stellt Hypothesen einer verzögerten Insektenevolution in Frage und deutet darauf hin, dass entsprechende Tierreste schlicht noch nicht gefunden wurden.

Die frühesten – noch flügellosen – Kerbtiere sind im Devon nachweisbar (416 bis 360 Millionen Jahre vor heute). Daran schließt sich ein Zeitraum von 60 Millionen Jahren an, in dem fast keine Insektenfossilien vorkommen. Erst nach dieser Lücke, in etwa 325 Millionen Jahre alten Gesteinen aus dem Karbon, tauchen plötzlich Überbleibsel von geflügelten Sechsbeinern in enormer Vielfalt auf.



NATURE 448, S. 82–85, 2012, FIG. 2A

Fossil des mutmaßlichen Fluginsekts *Strudiella devonica*. Sogar die Beine sind zu erkennen, wenn auch undeutlich.

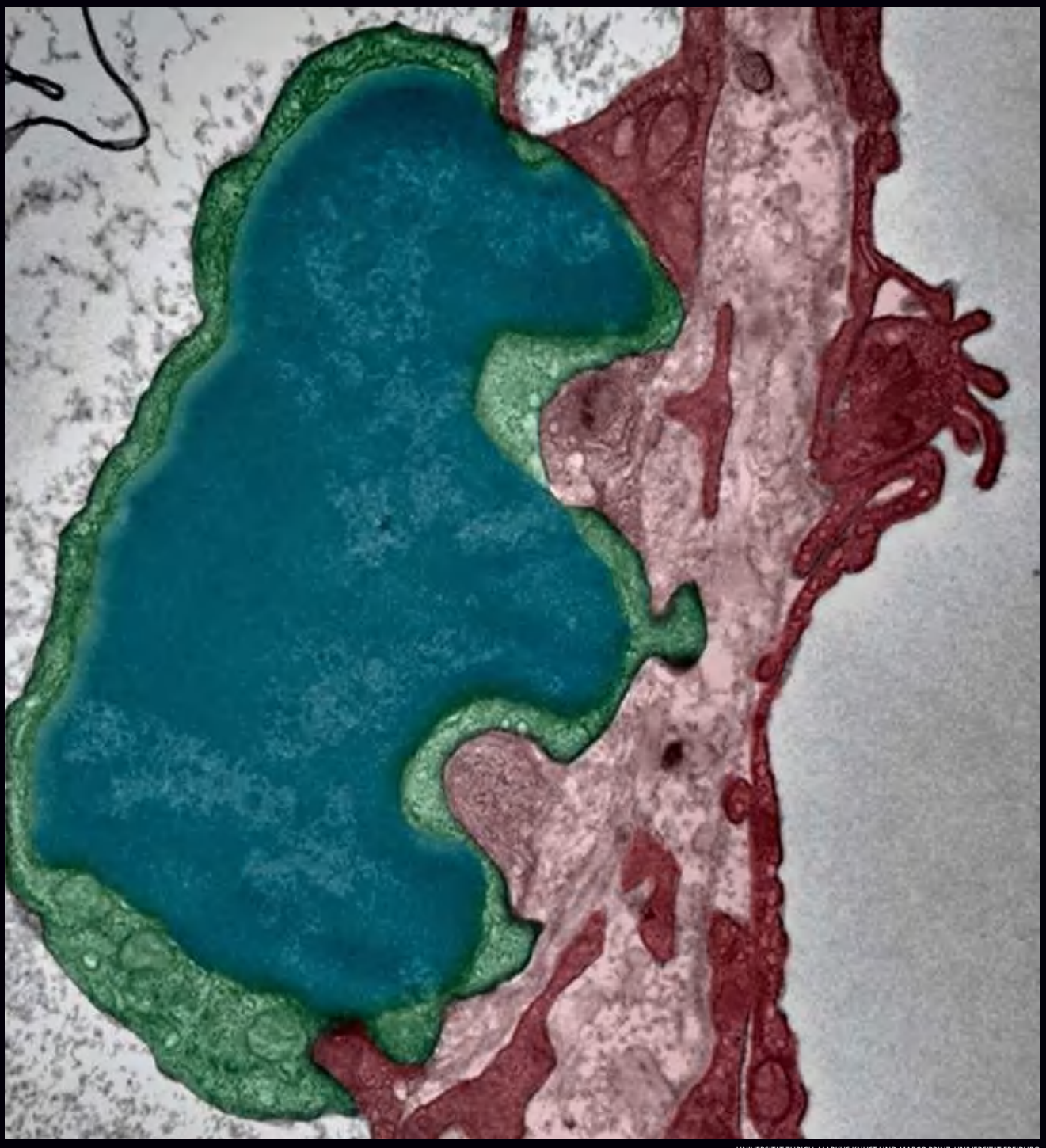
Wie es zu diesem Formenreichtum gekommen war und von welchen Vorfahren die Insekten im Karbon abstammten, beantwortet auch der neue Fund nicht. Allerdings lässt er die Hexapoden-Lücke in neuem Licht erscheinen. Die Vermutung, ein niedriger Sauerstoffanteil in der Atmosphäre habe die Entwicklung geflügelter Insekten bis ins Karbon hinein gebremst, erscheint nun zweifelhaft.

Nature 448, S. 82–85, 2012

TÜRÖFFNER FÜR KREBSZELLEN

Die überwiegende Mehrheit der Krebskranken stirbt nicht am Primärtumor, sondern an den Folgen von Tochtergeschwülsten (Metastasen). Diese entstehen, wenn in der Blutbahn kursierende entartete Zellen in andere Organe eindringen. Schweizer Forscher konnten nun nachweisen, dass ihnen dabei ein Pförtner auf der Innenwand (dem Endothel) der Blutgefäße hilft. Dieser Rezeptor wird von einem tumoreigenen Botenstoff aktiviert und schleust, wie auf dieser nachträglich eingefärbten elektronenmikroskopischen Aufnahme zu sehen ist, eine Krebszelle (blaugrün) zwischen den Endothelzellen einer Blutkapillare (rostrot) hindurch, indem er deren Zusammenhalt lockert. Seine Aufgabe im gesunden Körper ist noch unbekannt, wahrscheinlich beeinflusst er bei Immunreaktionen die Durchlässigkeit der Blutgefäße.

Cancer Cell 22, S. 91–105, 2012



UNIVERSITÄT ZÜRICH; MARKUS KNUST UND MARCO PRINZ, UNIVERSITÄT FREIBURG

HOCHENERGIEASTRONOMIE

Unerwartet energiereiche Gammablitze aus dem Krebsnebel

Der Krebsnebel ist der meistuntersuchte Überrest einer Supernova, doch im Gammalicht betrachtet bietet er noch überraschende Erkenntnisse. Als Forscher den rotierenden Neutronenstern im Zentrum des Nebels, einen Pulsar, ins Visier nahmen, stellten sie fest, dass gängige Modelle der Teilchenbeschleunigung durch Pulsare auf den Prüfstand gehören.

VON RAZMIK MIRZOYAN

Der Pulsar im Herzen des Krebsnebels, ein extrem kompakter Neutronenstern, misst nur wenige Kilometer und dreht sich 30-mal pro Sekunde um die eigene Achse. Sein Magnetfeld ist eine Billion Mal stärker als das der Erde, seine Dichte entspricht der eines Atomkerns. Neben energieärmerer elektromagnetischer Strahlung sendet er ununterbrochen geladene Teilchen aus, hauptsächlich Elektronen und Positronen, die im extrem starken Magnetfeld des Himmelskörpers auf hohe Energien beschleunigt werden.

Im Prinzip sind die sich anschließenden Vorgänge gut bekannt. Weil beschleunigte Ladungsträger stets elektromagnetische Wellen emittieren, entsteht Strahlung hoher Energie. Der Stern sendet diese so genannte Gammastrahlung, in Lichtkegeln gebündelt, entlang seiner Magnetfeldachse in beide Richtungen aus. Da diese aber nicht mit der Drehachse übereinstimmt, rotieren die beiden Kegel durch das All. Ist der Himmelskörper zufällig so im Raum orientiert, dass einer der Kegel dabei die Erde überstreicht, registrieren Beobachter ein periodisches Aufleuchten.

Nun allerdings müssen die Theoretiker nacharbeiten. Denn wie neue Daten aus dem Krebsnebel zeigen *(Astronomy & Astrophysics 540, A69, 2012)*, können sie die Entstehung der Gammastrahlung mit ihren Modellen noch nicht besonders gut erklären.

Der Krebsnebel ist der Überrest eines in 6300 Lichtjahren Entfernung explodierten Sterns, einer Supernova, und das meistuntersuchte Objekt seiner Art. Es gibt nur wenige andere, die sich näher an der Erde befinden. Dass er jetzt doch überraschend Neues zu bieten hat, ist der Entwicklung leistungsfähiger Tscherenkow-Teleskope zu verdanken. Sie vermessen den Himmel im Gammalicht, der energiereichsten elektromagnetischen Strahlung überhaupt. Instrumente wie MAGIC auf der Kanareninsel La Palma, VERITAS im US-Bundesstaat Arizona oder H.E.S.S. in Namibia haben das noch junge Forschungsfeld der Gammastrahlungsastronomie in den letzten Jahren enorm vorangetrieben. Mit ihrer Hilfe beobachten Forscher weltweit, darunter unsere Arbeitsgruppe am Max-Planck-Institut für Physik in München, mittlerweile auch den Krebsnebel bei höchsten Energien. Im Verlauf unserer Messungen, die einen Bereich von bis zu einigen hundert Gigaelektronvolt (GeV) abdecken, haben wir allerdings viel energiereichere Gammastrahlung gefunden, als der Pulsar gängigen Modellen zufolge aussenden sollte. Bisherige Vorstellungen davon, wie die kompakten Objekte geladene Teilchen beschleunigen, sind dadurch in Frage gestellt.

Mit einem Spiegeldurchmesser von jeweils 17 Metern zählen die beiden MAGIC-Teleskope (Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov) zu den größten Messinstrumenten für kosmische Gammastrahlung auf der Welt. MAGIC-I wurde 2002 bis 2004 gebaut, zu seinem Betrieb haben sich mehr als 150 Forscher aus Deutschland, Italien, Spanien, der Schweiz, Polen, Finnland, Bulgarien und Armenien zusammengeschlossen; mittlerweile sind auch kroatische und japanische Wissenschaftler hinzugekommen. Sein Standort auf La Palma ist das Observatorio Roque de Los Muchachos in 2200 Meter Höhe über dem Meeresspiegel.

Das zweite MAGIC-Teleskop errichteten wir 2009. Abgesehen von Verbesserungen wie größeren Spiegelelementen und empfindlicheren Photovervielfachern in der Kamera ist es ein Klon von MAGIC-I. Die 85 Meter voneinander entfernten Instrumente arbeiten im Koinzidenz- oder Stereomodus, beobachten also gleichzeitig dasselbe Objekt. Im Energiebereich von 25 bis 200 Gigaelektronvolt besitzt das Teleskoppaar die höchste Empfindlichkeit aller Gammateleskope weltweit.

Todesstoß für die gängige Theorie durch neue Pulsardaten

Während einer 22-stündigen Beobachtung des Krebsnebelpulsars im Jahr 2008 maß unser Münchner MAGIC-I-Team zum ersten Mal eindeutig ein pulsierendes Gammasignal mit einer Energie von mehr als 25 Gigaelektronvolt. Diese Entdeckung veröffentlichten wir im November 2008 in der Fachzeitschrift »Science«. Sie schloss die gängigste Theorie für die Emissionen des Krebspulsars aus: das Polarcap-Modell. Es besagt unter anderem, dass die Gammastrahlung maximal 20 bis 30 Kilometer über der Oberfläche des Pulsars entsteht – doch dann dürfte sie nur bis etwa 6 GeV messbar sein. Unsere Daten zeigten jedoch ein Energiespektrum, das sogar bis etwa 60 GeV und darüber hinaus reicht.

Anfangs mit einem, später mit beiden Teleskopen setzten wir die Beobach-

tungen fort. Takayuki Saito, einer unserer Doktoranden, analysierte Daten, die MAGIC-I zwischen 2009 und 2010 aufgenommen hatte. In seiner Dissertation berichtete er anschließend, dass das Spektrum sogar bis 100 GeV reicht und noch darüber hinausgeht. Seine Untersuchung stieß auf große Resonanz in Astronomenkreisen – ganz offenbar war das letzte Wort in Sachen Krebsnebelpulsar noch nicht gesprochen.

Unabhängig davon wertete Gianluca Giavitto Stereodaten von MAGIC aus und bestätigte Saitos Resultate. Giavitto ist Doktorand am IFAE (Institut de Fisica d'Altes Energies), dem Institut für Hochenergiephysik an der Universität Barcelona. Gemeinsam mit Stefan Klepser, der ebenfalls am IFAE arbeitet, fand er später sogar ein noch stärkeres Signal, erstaunlicherweise bei einer abermals höheren Energie. Unser Team beschloss daher, die verwendeten Analyseverfahren noch zu verfeinern. So würden wir das pulsierende Gammasignal des Pulsars, das etwa 100-mal schwächer ist als die kontinuierliche Gammastrahlung aus dem Nebel, auch noch bei höheren Energien erkennen.

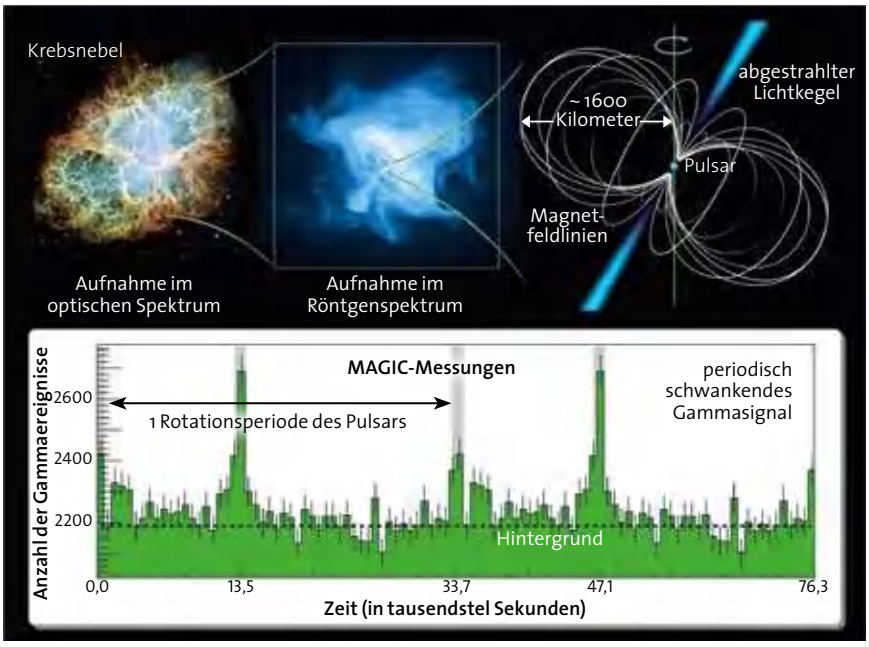
Doch bevor wir die Ergebnisse veröffentlichen konnten, erlebten wir eine Überraschung – die Konkurrenz war uns zuvorgekommen! Im Mai 2011 berichtete Nepomuk Otte auf einer Konferenz in Rom von Krebspulsarmessungen von 120 bis etwa 250 GeV. Er hatte sie mit VERITAS durchgeführt, dem aus vier Teleskopen bestehenden Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System in Arizona. Vor drei Jahren war Otte dorthin gewechselt, nachdem er in unserer Münchner Arbeitsgruppe seine Promotion abgeschlossen hatte.

Aber auch wir hatten ein starkes Signal entdeckt, das sogar bis 400 GeV reichte. Dabei stießen wir zudem auf ein sehr interessantes Detail. Beim Krebspulsar messen Astronomen stets eine Art Doppelpuls – offenbar besitzt der Pulsarstrahl eine Substruktur. Die beiden Aufleuchtphasen sind im Energiebereich um 25 GeV etwa gleich stark. Wir haben jedoch herausgefunden, dass bei einigen hundert GeV der zweite Impuls den ersten sehr deutlich dominiert. Noch haben wir für dieses Phänomen keine zufrieden stellende Erklärung, doch kann es uns sicher weitere Erkenntnisse über die Physik des Pulsars liefern.

Die Messung von Gammastrahlung so hoher Energie ist nicht einfach. Wenn Gammaphotonen – oder auch geladene kosmische Partikel – in die Erdatmosphäre eindringen, lösen sie Schauer sekundärer Elementarteilchen aus, hauptsächlich Elektronen und Positronen. Diese bewegen sich schneller durch die Luft als Licht und lassen dadurch das charakteristische bläuliche Tscherenkowlicht entstehen, das für milliardstel Sekunden aufleuchtet. Wegen ihrer kurzen Dauer bleiben die Lichtblitze für das menschliche Auge

ROBERT WAGNER, MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PHYSIK, MÜNCHEN

Mit ihren jeweils 17 Meter messenden Hauptspiegeln gehören die beiden MAGIC-Teleskope auf der kanarischen Insel La Palma zu den größten Luftschauer-Tscherenkow-Teleskopen weltweit. Sie arbeiten im Stereomodus, peilen also stets dasselbe Objekt an.



LINKS OBEN: NASA / ESA / ASU, J. HESTER, A. LOLL; MITTE: NASA / CXC / SAO, F. SEWARD ET AL.; RECHTS OBEN: MYSID / JM SMITS / CC-BY-SA-3.0 (HTTP://CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY-SA/3.0/); UNTEN: MAGIC-KOLLABORATION

Der Krebsnebel (optische Aufnahme links) ist der bestuntersuchte Überrest einer Supernova. In seinem Zentrum rotiert ein Neutronenstern, ein so genannter Pulsar, 30-mal pro Sekunde um sich selbst. Neben einem »Wind« geladener Teilchen (Mitte, im Röntgenlicht gesehen) emittiert er in Richtung seines Magnetfelds auch elektromagnetische Strahlung. Sie wird in Form zweier Lichtkegel abgestrahlt, die ebenfalls durch das All rotieren (rechts). Einer der Kegel überstreicht dabei regelmäßig die Erde, so dass Astronomen ein periodisch schwankendes Signal messen. MAGIC registriert die Gammastrahlungsanteile dieser Pulse (Diagramm).

zwar unsichtbar. MAGIC aber kann das Licht mit seiner großen Spiegelfläche sammeln und, ähnlich wie das Objektiv eines Fotoapparats, die Form der Teilchenschauer auf eine Kamera in der Fokalebene projizieren.

Teleskope registrieren selbst einzelne Photonen

Diese Kamera muss extrem kurze Belichtungszeiten erlauben und benötigt folglich eine sehr hohe Lichtempfindlichkeit. Denn ein typisches Gammaquant mit einer Energie von 50 Gigaelektronvolt, das auf die Atmosphäre trifft, lässt – auf die Erdoberfläche projiziert – gerade einmal fünf Tscherenkow-Photonen pro Quadratmeter entstehen. Zum Vergleich: Selbst wenn sich ein menschliches Auge stundenlang an die Dunkelheit gewöhnt hat, benötigt es eine Dichte von mindestens 200 000 Photonen pro Quadratmeter, um ein Signal gerade eben noch wahrzunehmen.

Auch spezielle Bildverarbeitungssoftware ist nötig. Denn auf 5000 Schauer, die durch geladene Teilchen ausgelöst wurden, kommt typischerweise nur ein einziger, der von einem Gammaphoton herrührt. Die Algorithmen müssen diese seltenen Fälle anhand der Form der Tscherenkowblitze identifizieren.

Die jüngsten Daten verlangen nach neuen Theorien. Diese müssen erklären, wie ein Pulsar Teilchen auf so hohe Energien beschleunigt, dass sie die beobachtete Gammastrahlung aussenden. Ideen gibt es bereits. Kouichi Hirotani von der Academia Sinica des taiwanesischen Institute of Astronomy and Astrophysics hält die hochenergetischen Gammastrahlen für das Resultat eines Streuprozesses.

Gestreut werden dabei nicht die direkt vom Pulsar ausgehenden Elektronen und Positronen, sondern ihre Abkömmlinge der zweiten und dritten Generation. Diese entstehen in bis zu 1500 Kilometer Höhe über der Oberfläche des Sterns durch die so genannte Paarbildung, bei der energiereiche Gammaquanten in Wechselwirkung mit Röntgenstrahlung oder extrem starken Magnetfeldern treten. Anschließend interagieren die Teilchen mit Photonen. Dabei kommt es zum inversen Comptoneffekt: Weil die Partikel so viel Energie besitzen, geben sie einen Teil davon an die Photonen ab und verwandeln sie in energiereiche Gammaquanten.

Einen anderen Vorschlag machen Felix Aharonian vom Institute for Advanced Studies in Dublin und seine Koautoren Sergey Bogovalov und Dmitry Khangulyan. Demnach entstehen die Gammaphotonen möglicherweise, wenn beschleunigte Teilchen aus der Pulsarwindregion, 100-mal weiter entfernt als Hirotanis Modell dies annimmt, an Röntgenstrahlung gestreut werden, die aus der Magnetosphäre des Pulsars stammt.

Ob diese Theorien zutreffen, können letztlich nur weitere Messungen entscheiden. Hin zu höheren Energien – Aharonian und seine Kollegen sagen beispielsweise ein Maximum von 500 GeV voraus – wird die Analyse aber zunehmend schwieriger. Denn das pulsierende Signal verliert an Intensität, während sich die kontinuierliche Hintergrundstrahlung verstärkt.

Interessant wäre auch ein Vergleich mit anderen Pulsaren. Doch diese sind in der Regel weiter entfernt als der Krebsnebel. Um auch ihre Gammasignale messen zu können, braucht man neben einwandfrei funktionierenden und hochempfindlichen Großteleskopen daher viel Beobachtungszeit, Geduld – und vielleicht auch ein bisschen Glück. MAGIC jedenfalls ist in Bestform, seit Herbst 2012 arbeitet es sogar mit einer noch lichtstärkeren Kamera. Wir sind daher zuversichtlich, bald mit neuen Entdeckungen und Überraschungen aufwarten zu können.

Razmik Mirzoyan ist promovierter Physiker und stellvertretender Sprecher der internationalen MAGIC-Kollaboration sowie MAGIC-Projektleiter am Max-Planck-Institut für Physik.

Vorgeburtlicher Gentest ohne Risiko

Gleich zwei Forscherteams ist es gelungen, das Genom ungeborener Kinder mit Hilfe von Fragmenten fötaler DNA im mütterlichen Blut zu sequenzieren. Dadurch lassen sich Anlagen für genetisch bedingte Krankheiten künftig nachweisen, ohne Mutter oder Kind zu gefährden.

VON MAREN EMMERICH

Wenn werdende Eltern herausfinden wollen, ob ihr Kind von einer Chromosomenstörung oder einer genetisch bedingten Stoffwechselerkrankung betroffen ist, haben sie bisher die Wahl zwischen zwei Untersuchungsmethoden. Bei der Chorionzottenbiopsie entnimmt der Arzt Bestandteile der Plazenta, um so an fötale Zellen zu gelangen. Diese lassen sich alternativ auch aus dem Fruchtwasser gewinnen, was bei der Amniozentese geschieht. Hierfür muss zunächst die Fruchtblase mit einer Nadel angestochen werden.

Dabei handelt es sich um invasive Methoden, welche die Wahrscheinlichkeit einer Fehlgeburt erhöhen. Deshalb greifen Mediziner nur bei Risikoschwangerschaften darauf zurück, etwa wenn Ultraschallbilder auf Fehlbildungen hinweisen. Eine Ausnahme bildet die Trisomie 21 (Downsyndrom), bei der Chromosom 21 drei- statt zweifach vorhanden ist. Hierauf lässt sich das Genom eines Fötus bereits mit einem nichtinvasiven Test untersuchen, der in Deutschland Ende August dieses Jahres auf den Markt kam und für den die Schwangere nur einige Milliliter Blut abgeben muss. Künftig könnten ähnliche Tests noch weitaus mehr über genetisch bedingte Krankheiten ungeborener Kinder verraten. Mittlerweile haben Forscher nämlich einen Weg gefunden, das komplette Genom eines Fötus aus den DNA-Fragmenten zu sequenzieren, die er im Blut der Mutter hinterlässt.

Im Plasma, also dem nicht zellulären Anteil des Bluts, schwimmen begrenzte Mengen an DNA frei herum. Bei Schwangeren stammen durchschnittlich 13 Prozent davon vom Fötus. Um diese diagnostisch nutzen zu können, hatten Wissenschaftler eine wesentliche Hürde zu überwinden: Sie mussten einen Weg finden, zuverlässig zu unterscheiden, welche Erbgutstückchen von der Mutter und welche von ihrem Kind stammen. Wenn es um große, zusammenhängende DNA-Fragmente geht, ist dies noch verhältnismäßig einfach: Besitzt das Ungeborene beispielsweise eine Kopie von Chromosom 21 zu viel, dann ist dieses auch im mütterlichen Plasma im Verhältnis zu allen anderen Chromosomen überrepräsentiert – was der neue Trisomietest zur Diagnose nutzt. Um jedoch Mutationen innerhalb einzelner fötaler Gene aufzuspüren, mussten sich die Forscher ausgefeiltere Strategien ausdenken,

Jacob Kitzman und Kollegen von der University of Washington in Seattle zogen zusätzlich die aus Speichel gewonnene DNA des Vaters heran *(Science Translational Medicine 137, 137ra76, 2012)*. Von der Frau, die in der 19. Woche schwanger war, nahmen sie eine Blutprobe. Aus den darin enthaltenen Zellen isolierten sie Erbmaterial, das allein von ihr selbst stammte. Im Plasma dagegen befand sich zusätzlich DNA des Fötus.

Mit Hilfe dieser Proben sequenzierten die Forscher sowohl das Genom beider Eltern als auch die DNA im Blutplasma der Frau. Genvarianten, die hier selten, bei Mutter und Vater aber überhaupt nicht vorkamen, konnten die Wissenschaftler dem Fötus zuschreiben. Auf diese Weise identifizierten sie 39 Punktmutationen, also Veränderungen einzelner Nukleotidbausteine, in

Natur
Energie
Plus

Mit der Natur auf einer Welle.

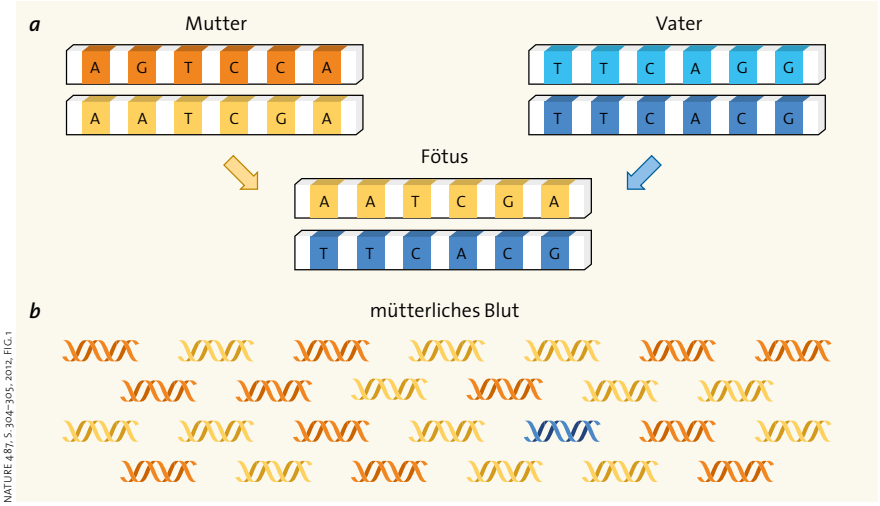
In den letzten zwölf Monaten haben sich über 30.000 Bürger für Strom aus 100 % Wasserkraft von NaturEnergiePlus entschieden. Wann wechseln Sie zum Strom aus sauberer Quelle?

→ Jetzt wechseln!

www.naturenergieplus.de

dessen DNA. Als sie das Erbgut des Kindes nach seiner Geburt zur Kontrolle erneut analysierten, kamen sie auf 44 Mutationen. Insgesamt erwiesen sich die Ergebnisse der ersten Sequenzierung zu 98,1 Prozent als korrekt.

Das zeigt, dass sich Defekte im fötalen Erbgut mit einem DNA-Test prinzipiell ähnlich zuverlässig vorhersagen lassen wie durch invasive Untersuchungsmethoden. Dass dies auch schon in einem früheren Stadium der Schwangerschaft funktioniert, wiesen die Forscher nach, indem sie das Experiment mit einer zweiten Familie wiederholten, in der sich die Frau in der 9. Woche befand.



NATURE 487, S. 304–305, 2012, FIG. 1

Von jedem Genomabschnitt hat ein Fötus je eine Version von Mutter und Vater. Da etwa 13 Prozent der freien DNA im Blut einer Schwangeren vom Kind stammen, zirkulieren dort drei verschiedene solcher Haplotypen. Der, den die Mutter an ihr Kind weitergegeben hat, ist am stärksten vertreten (gelb). Am zweithäufigsten sind Genvarianten, die im mütterlichen Erbgut, nicht aber in dem des Fötus vorkommen (orange). Der dritte und seltenste Haplotyp besteht aus den Genomabschnitten, die das Kind vom Vater geerbt hat (dunkelblau). Diese Häufigkeitsunterschiede haben Forscher ausgenutzt, um fötale DNA im Blut der Mutter zu identifizieren und zu sequenzieren.

Ohne den Vater geht es auch

Noch eleganter ging eine Gruppe um Steven Quake von der Stanford University (Kalifornien) vor. Die Wissenschaftler sequenzierten das Genom zweier Föten, ohne dafür DNA-Proben von deren Vätern zu verwenden *(Nature 320, S. 320, 2012)*. Ihr Trick: Sie schauten, wie häufig die einzelnen Versionen jedes Genomabschnitts – die so genannten Haplotypen – im Blutplasma der Mutter vorlagen. Da der Mensch über einen doppelten Chromosomensatz verfügt, hat er auch zwei Haplotypen von jedem Stückchen DNA. Beide sind selbstverständlich im Blut der Frau vorhanden. Einen von ihnen hat aber auch ihr Kind geerbt, weshalb er etwas häufiger vorkommen sollte als der andere. Der zweite Haplotyp des Fötus stammt dagegen von seinem Vater. Mit der DNA des Ungeborenen gelangen hiervon ebenfalls geringe Mengen in den Blutkreislauf der Frau, wo sie den dritten Haplotyp bilden, der allerdings nur in relativ geringer Konzentration vorliegt.

Die Forscher sequenzierten alle Genomabschnitte aus dem Blut von zwei Schwangeren durchschnittlich 52,7-mal. Diese Redundanz erlaubte es ihnen festzustellen, welcher der drei Haplotypen dort am seltensten und welcher am häufigsten vorkam. Hieraus konnten die Forscher die genetische Ausstattung der Kinder ableiten. In einem Fall litt die werdende Mutter unter dem DiGeorge-Syndrom – eine der beiden Kopien ihres 22. Chromosoms enthielt weniger Gene als normal. Mit Hilfe des DNA-Tests, den die Forscher in allen drei Schwangerschaftstrimestern wiederholten, konnten sie nachweisen, dass die Frau die verkürzte Version des Chromosoms an ihr Kind weitergegeben hatte.

Eine derart exzessive Genomanalyse erforderte den Einsatz modernster Sequenzierverfahren. Nur dadurch blieben Zeitaufwand und Kosten in einem vertretbaren Rahmen. Dennoch wäre es viel zu teuer, mit den geschilderten Methoden reihenweise fötale Genome auf jede einzelne Mutation hin zu testen. Quake und sein Team prüften die Möglichkeit, an Stelle des gesamten Genoms nur jene zwei Prozent zu sequenzieren, die Bauanleitungen für Proteine enthalten. Wie sich herausstellte, reicht auch eine Sequenzierung dieses relativ kleinen Anteils aus, um die vom Fötus stammenden Genvarianten auszumachen und zu analysieren.

Von solchen Machbarkeitsstudien bis zu praktisch einsetzbaren Bluttests auf die verschiedensten Erbkrankheiten bei Ungeborenen scheint der Weg also nicht mehr allzu weit. Natürlich werden sich Wissenschaft, Politik und Gesellschaft dann auch mit den ethischen Fragen auseinandersetzen müssen, die derlei Möglichkeiten aufwerfen. Bei dem neuen Trisomietest ist die Diskussion bereits voll im Gange *(Kommentar auf www.spektrum.de vom 11. 07. 2012)*.

Jenseits jeglicher ethischen Problematik brächte eine routinemäßige Sequenzierung der DNA Ungeborener aber auch einige klare Vorteile: So könnte man Krankheiten, die ein Fötus ohne Behandlung nicht oder nur schwer überlebt, künftig schon vom ersten oder zweiten Trimester einer Schwangerschaft an im Mutterleib therapieren. Auch Stoffwechselstörungen wie zum Beispiel verschiedene Nahrungsmittelunverträglichkeiten, bei denen Gegenmaßnahmen schon unmittelbar nach der Geburt hilfreich sind, ließen sich von Anfang an effektiv behandeln. Und durch Chorionzottenbiopsie oder Amniozentese verursachte Fehlgeburten würden endgültig der Vergangenheit angehören.

Dr. Maren Emmerich ist Biologin und Wissenschaftsautorin in Heidelberg und München.

Prionen bei Pilzen

Prionen erlangten Berühmtheit als Krankheitserreger bei Wirbeltieren, die nach Änderung ihrer Form das Gehirn zerstören. Aber auch bei Pilzen kommen solche umgestalteten Proteine vor – und zwar offenbar vielfältig und mit hilfreichen Aufgaben.

VON JOHANNES SANDER

Jedes Protein in einer Zelle besitzt eine spezifische räumliche Struktur, die seine normale Funktion bedingt. Doch einige – so genannte Prionproteine oder Prionen – können sich in eine ungewöhnliche Form falten, in der sie ihre ursprüngliche Bedeutung verlieren.

Diese tendieren dazu, sich zu stäbchen- oder plaqueförmigen Aggregaten und Filamenten (Amyloiden) zusammenzulagern. Anfangs entstehen die anomal gefalteten Proteine wohl meist einfach durch Zufall. Doch das Besondere an ihnen ist: Die Prionenstruktur wirkt auf andere gleiche Proteine ansteckend, so dass diese auch die anomale Form annehmen. Hat also der Prozess einmal begonnen, setzt er sich kaskadenartig fort.

Entdeckt und bekannt wurden Prionen im Zusammenhang mit neurodegenerativen Erkrankungen wie der Rinderseuche BSE oder dem Creutzfeldt-Jakob-Syndrom bei Menschen. Hierbei tragen die auffälligen Moleküle offensichtlich zur Zerstörung von Hirngewebe bei. Ob sie auch an der Alzheimerdemenz beteiligt sind, wie neuere Tierstudien andeuten, ist noch strittig.

Weniger bekannt ist, dass derart umgeformte und sich zu Amyloiden zusammenlagernde Proteine auch bei Pilzen auftreten. Tatsächlich fanden Forscher in den letzten Jahren Prionen unter anderem bei Hefen und Schlauchpilzen. Verblüffenderweise scheinen diese dem betreffenden Organismus oft gar nicht zu schaden – im Gegenteil. Manche von ihnen sorgen zum Beispiel dafür, dass nur Myzelien verwandter Pilzstämme fusionieren können und in einem nichtsexuellen Prozess genetisches Material miteinander austauschen. Andere fördern sogar evolutionäre Anpassungen, indem sie unter harten Bedingungen die Durchsetzung von genetischen Mutationen erleichtern.

Waffe gegen Fremdheit

Viele Pilze bilden in ihrem Substrat ein ausgedehntes Myzel, ein Geflecht aus Zellfäden. Manchmal fusionieren die Myzelien zweier Organismen zu so genannten Heterokaryen. Dann enthalten die dem neuen Myzel entspringenden Zellen zwei oder mehr Zellkerne, die sich genetisch unterscheiden. Aller-

ANZEIGE

EMBL European Molecular Biology Laboratory

Career Opportunities

- PhD Students
- Postdocs
- Independent scientists

www.embl.org/jobs

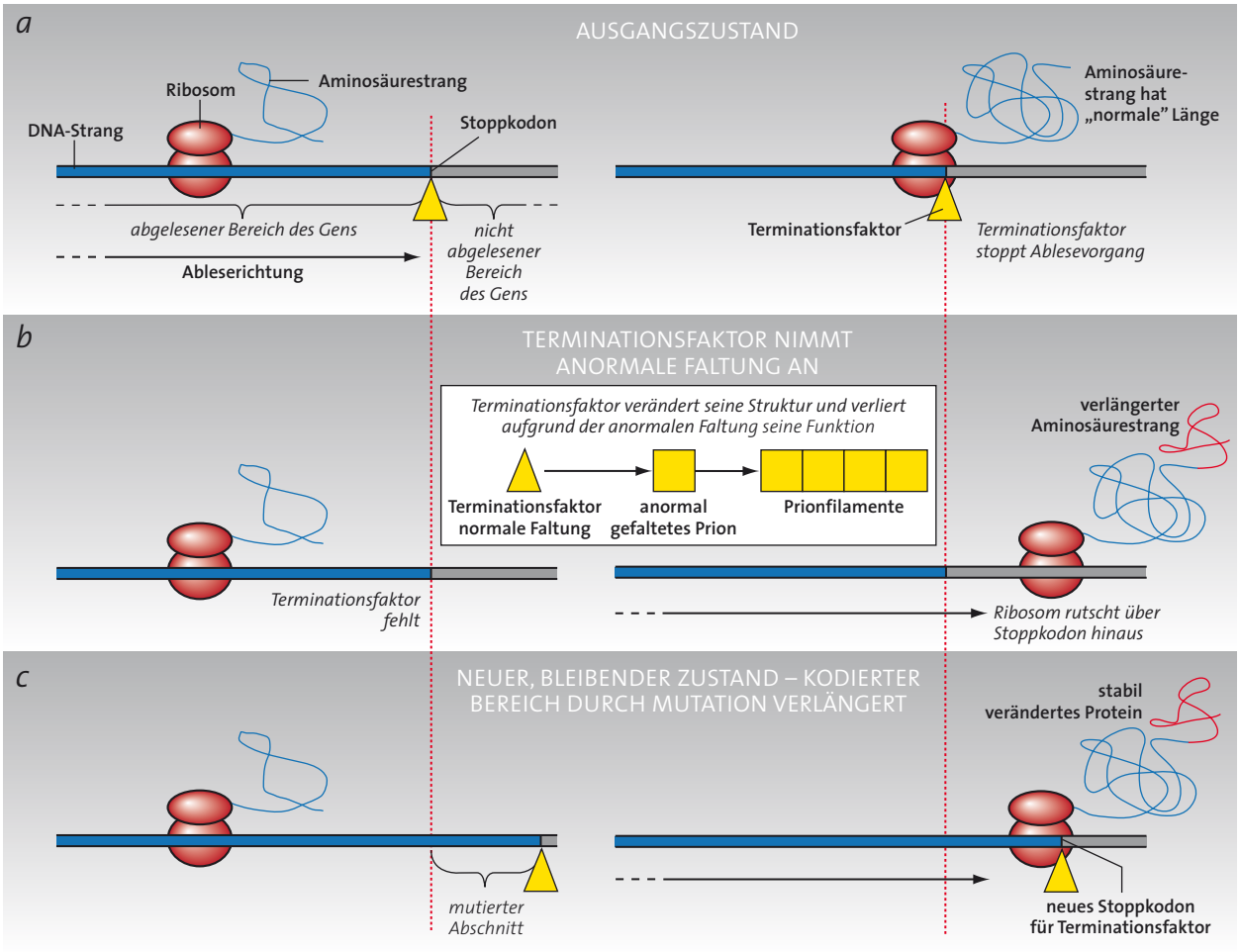
dings gelangen bei solch einer Fusion unter Umständen auch Viren, die einen von den Ursprungsorganismen befallen hatten, mit in das neue Myzel. Aber zahlreiche Pilze verstehen sich gegen die Infektionsgefahr zu wehren. Sie verfügen über Mechanismen, dank derer nur Myzelfusionen bestimmter Pilzstämme möglich sind.

Eine derartige Waffe stellt das HET-s-System dar (die Abkürzung steht für Heterokaryon), das am besten bei dem Schlauchpilz *Podospora anserina* untersucht ist *(Proceedings of the National Academy of Sciences USA 109, S. 10432, 2012)*. Hier können nur Stämme miteinander fusionieren, die HET-s-Proteine bilden. Es handelt sich dabei um regelrechte Prionproteine: Sie können in eine anomale Form umschlagen (siehe Bild S. 21) und sich dann zu Filamenten zusammenlagern, die dem Pilz allerdings nicht schaden. Nun erzeugen manche Pilzmyzelien aber die Variante HET-S, bei der keine Prionenfilamente entstehen. Kommen Myzelien eines HET-s- und eines HET-S-Stamms zusammen, verhindert das nicht nur die Filamentbildung, sondern die Fusionsstelle stirbt sogar ab. Deswegen fusionieren nur ähnliche, in der Regel wohl verwandte Stämme miteinander, so dass Umweltressourcen, die einer der Organismen erschließt, im gemeinsamen Myzel beiden zugutekommen.

Ein weiteres Pilz-Prion, das seinem Besitzer nützt, ist der Translations-Terminationsfaktor Sup35. Dieses Protein weisen Hefen der Gattung *Saccharomy-*

Evolutionsschub für Pilze

Normalerweise hält ein als Terminationsfaktor bezeichnetes Protein den Ablesevorgang am Gen an einem Stoppkodon an (*a*). Schlägt seine Struktur jedoch in die anomale Form des Prions um, so geht diese Funktion verloren: Der Eiweißfaden wird länger (*b*). Manchmal besitzt das verlängerte Protein günstige Eigenschaften, denn der bisher nicht abgelesene Bereich des Gens konnte unbehelligt Mutationen anhäufen. Mutiert nun das Stoppkodon in eine Anweisung für eine Aminosäure, so bleibt das neue Protein erhalten – auch nachdem das Prion wieder zur Struktur des Terminationsfaktors zurückgekehrt ist (*c*).



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK

DAS ENTSCHEIDENDE IN EINER APP!

NEU: DIE FOCUS MAGAZIN APP

GRATIS FÜR ABONNENTEN

Jetzt den digitalen FOCUS kaufen oder als Abonnent des FOCUS Magazins gratis downloaden.

Exklusive Inhalte, spektakuläre Bilder, hoher Nutzwert: Erleben Sie Deutschlands großes Nachrichtenmagazin neu auf dem Tablet – bequem und schnell schon sonntags ab 8 Uhr. Einfach QR-Code scannen oder direkt auf www.focus.de/magazin/digital

Erhältlich im App Store | Google play

Das Entscheidende im FOCUS

Mit Higgs zum Mars?

Großforschung unter Rechtfertigungsdruck

Der Sommer bescherte den Naturforschern zwei spektakuläre Erfolge auf ganz unterschiedlichen Gebieten. In der Elementarteilchenphysik wurde – »mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit« – das Higgs-Boson nachgewiesen, und der Marssonde Curiosity gelang eine Bilderbuchlandung auf dem Roten Planeten.

Meine Freunde, die mich als wissenschaftsaffin kennen, konfrontierten mich entsprechend häufig mit der Frage, was das Higgs eigentlich sei und warum seine Entdeckung die Physiker so begeistere. Nachdem ich wie üblich die Higgs-Teilchen mit rabiaten Fans bei einer Filmpremiere verglichen hatte, durch die sich die Stars – andere Elementarteilchen – mühsam einen Weg bahnen müssen und so Masse gewinnen, kam sofort die nächste Frage: Und wozu braucht man das? – Ähm ...

Auch das Kunststück, ein Gerät von der Größe eines Kleinwagens sanft auf dem Mars abzusetzen, provozierte den Einwand, die dafür verbrauchten Dollarmilliarden dienten doch nur dazu, mit einem sündteuren Modellauto auf einer staubtrockenen Steinwüste umherzukurven. Sollte man mit dem Geld nicht besser dringende Probleme auf der Erde lösen?

Derlei Fragen und Einwände brachten mich in Erklärungsnot. Ich stotterte etwas von wissenschaftlicher Neugier als Wert an sich und versuchte den Large Hadron Collider mit mittelalterlichen Kathedralen zu vergleichen, deren Bau doch auch dokumentiere, dass der Mensch über sich hinausstrebe. Aber meine Gesprächspartner blieben dabei: Angesichts der herrschenden Wirtschaftskrise seien gigantische Teilchenschleudern und kostspielige Marsflüge ein fragwürdiger Luxus.

Erst als ich mich auf die Möglichkeit berief, dass sogar aus der anwendungsfernsten Grundlagenforschung eines Tages nützliche Alltagsgeräte hervorgehen können, gaben sich die Kritiker achselzuckend halbwegs zufrieden. Vielleicht, so spekulierte einer, werde aus dem Higgs-Boson bald ein Antrieb für billige Marsraketen hervorgehen – und das Gespräch endete in allgemeinem Gelächter.

Doch das Problem, wie teure Grundlagenforschung angesichts knapper Kassen zu rechtfertigen ist, lässt sich nicht so einfach beiseiteschieben. Es gibt ein abschreckendes Beispiel, was geschehen kann, wenn der schnöde Mammon störend ins Spiel kommt: In den USA wurde 1993 der Bau des Superconducting Super Collider (SSC) abgebrochen, obwohl bereits für zwei Milliarden Dollar ein gewaltiger Tunnel gegraben worden war. Darum versucht die Weltraumbehörde NASA derzeit verzweifelt, ihre teuren Missionen – auch die zum Mars – in der Öffentlichkeit mit dem populären Interesse an außerirdischem Leben zu rechtfertigen.

Das ist ein hochriskantes Spiel. Denn die junge Astrobiologie kämpft mit dem Verdacht, sie sei nur aus der Taufe gehoben worden, um für die Weltraumforschung Stimmung zu machen *(siehe auch Nature 488, S. 160, 2012)*. Vorschnell glaubten Experten 1996, in einem Marsmeteoriten Lebensspuren entdeckt zu haben. Die haben sich unterdessen ebenso als Schimäre erwiesen wie eine exotische DNA auf Arsenbasis, die auf alternative Lebensformen hingewiesen hätte.

Wer die Erforschung des Weltraums allzu einseitig mit der Hoffnung auf die baldige Entdeckung außerirdischen Lebens rechtfertigt, riskiert Enttäuschungen und infolgedessen erst recht Budgetkürzungen. Besser bleibt es – wie bei der Jagd nach fundamentalen Teilchen – beim ehrlichen Bekenntnis zur Neugier, die ja auch der neuen Marssonde ihren Namen lieh. Als jüngsten Beleg für diese zutiefst menschliche Eigenschaft überraschte mich soeben meine elfjährige Enkelin vor dem Einschlafen mit ihrem größten Reisewunsch: Sie würde zu gern einmal auf dem Jupitermond Europa stehen.

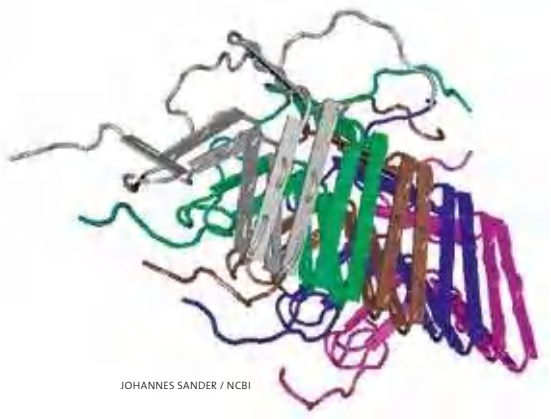
Michael Springer

ces auf, darunter die Bäckerhefe. Ein normal gefaltetes Sup35-Protein stoppt die Translation der Erbinformation in Proteine – also das Übersetzen der Nukleotidsequenzen der Boten-RNA in eine Abfolge von Aminosäuren – an der jeweils richtigen Stelle: nämlich dort, wo der Strang aus Nukleotiden ein so genanntes Nonsense- oder Stoppkodon aufweist (siehe Kasten S. 18, *a*).

Leiden Hefezellen unter Stress, steigt die Wahrscheinlichkeit, dass Sup35 in die Prionform umschlägt (Kasten S. 18, *b*). Weil ihnen dieser Terminationsfaktor nun fehlt, stellen sie übermäßig lange Aminosäuresequenzen her – und damit unter Umständen Proteine mit anderen Eigenschaften. Oft dürfte das nachteilig sein, kann aber manchmal auch einen Vorteil bedeuten – zumal unter schwierigen Umweltverhältnissen, die neue Anpassungen herausfordern. Überdies ist der Abschnitt hinter einem Stoppkodon oft genetisch deutlich variabler als der davor – weil dieser Bereich normalerweise wenig Selektionsdruck erfährt, wohingegen der Abschnitt davor stets die Proteinfunktion zu gewährleisten hat. Mutationen hinter dem Stoppkodon werden deswegen selten wieder ausgemerzt.

Einige der unter Stress gebildeten verlängerten Proteine könnten den Hefen helfen, die neue schwierige Situation besser zu meistern. Und nicht nur das: Die Pilze gewinnen auch Zeit, bis vielleicht Mutationen ein Stoppkodon in ein kodierendes Element für eine Aminosäure verwandeln. Dann wird eine zunächst unter Sonderbedingungen nur »probeweise« aufgetretene Merkmalsänderung genetisch fixiert (Kasten S. 18, *c*). Das erinnert an Lamarcks Theorie von der Vererbung erworbener Eigenschaften: Zuerst wird etwas Neues ausprobiert und im Erfolgsfall dann fest im Erbgut verankert.

Bemerkenswerterweise verbleibt umgewandeltes Sup35 nicht unbedingt in der Prionform. Wenn zum Beispiel die schwierige Umweltsituation aufhört, kann es sich in den funktionalen Terminationsfaktor zurückverwandeln. Dann stellt sich für den betreffenden Hefestamm weit gehend wieder der



JOHANNES SANDER / NCBI

Die Domänen für die Amyloidfaltung von fünf Het-s-Proteinen bilden miteinander ein kurzes Filamentstück.

Ausgangszustand ein – abgesehen von Genen mit zwischenzeitlich mutiertem Stoppkodon. Und weil die Umwandlung von Sup35 in die Prionform nur in einem Teil der Population erfolgt, bleibt der Stamm insgesamt vielseitig genug für andere neue Herausforderungen.

Seit Forscher Phänomene wie diese entdeckten, rätseln sie, ob sie damit häufigen und wesentlichen Erscheinungen in der Natur auf der Spur sind oder ob es sich um seltene Randereignisse handelt, vielleicht sogar nur um Laboreffekte an gezüchteten Pilzkulturen. Das hat nun ein Team um Randal Halfmann und Susan Lindquist vom Whitehead Institute in Cambridge (Massachusetts) untersucht *(Nature 482, S. 363, 2012)*. Sie prüften fast 700 verschiedene Wildstämme der Hefegattung *Saccharomyces* auf Prionen und deren Bedeutung. Diese Hefen stammten aus ganz unterschiedlichen Lebensräumen, zum Beispiel von Früchten, etwa diversen Weintraubensorten, oder aus Bodenproben verschiedenster geografischer Herkunft; einige waren aber auch kommerziell genutzte Stämme.

Wie die Forscher herausfanden, sind aus dem Labor bekannte Hefeprionen wie Sup 35 bei den Wildstämmen weit verbreitet und helfen ihnen tatsächlich in vielfältiger Weise, zu überleben sowie sich an neue, schwierige Umweltbedingungen auch genetisch rasch anzupassen. Zugleich entdeckte das Team rund zwei Dutzend weitere neue Prionproteine von ähnlicher Bedeutung. Die Wissenschaftler machten sich zu Nutze, dass sich die meisten dieser Prionen nur in Anwesenheit eines bestimmten Hitzeschockproteins dauerhaft erhalten, das die Zellen bei Stress herstellen. Dieses Protein konnten sie mit Hilfe einer Chemikalie ausschalten. Prompt verloren die Hefezellen ihre vielseitige Anpassungsfähigkeit an neue Umwelten. Mit der Möglichkeit, Prionen zu bilden, wuchs dagegen die genetische Vielfalt, und sogar in ihrer natürlichen ökologischen Nische hatten die Stämme einen Wachstumsvorteil.

Die Durchschlagskraft dieses bisher übersehenen Evolutionsmechanismus erstaunt: Etwa 40 Prozent der mit Prionenhilfe aufgetretenen neuen Eigenschaften waren für die Hefezellen vorteilhaft. Bei klassischen genetischen Mutationen ist die Erfolgsrate sehr viel geringer. Halfmann und Lindquist vermuten deswegen, dass es sich um ein seit Langem bewährtes, von Selektionskräften optimiertes Anpassungssystem handelt.

Ob die neuen Erkenntnisse auch Einsichten zu menschlichen Prionenerkrankungen bringen werden, lässt sich zurzeit noch schwer abschätzen. Immerhin fanden sich bereits Hinweise, dass Amyloide wohl auch zum Speichern von Peptidhormonen dienen können. Und wahrscheinlich tritt ein Prion nicht nur in der einen anormalen Proteinform auf, sondern in vielerlei Stämmen und Subtypen von jeweils etwas anderer Raumstruktur. Die einzelnen Versionen scheinen unterschiedlich infektiös und toxisch zu sein – was vielleicht den oftmals sehr verzögerten Ausbruch einer Erkrankung bedingen könnte. Womöglich sind manche Formen ungefährlich oder sogar wünschenswert.

Bisher wurden Prionen allerdings nur bei Wirbeltieren und Pilzen gefunden. Jetzt gilt es herauszufinden, ob sie auch noch bei anderen Organismengruppen vorkommen.

Dr. Johannes Sander ist Biologe mit Schwerpunkt Botanik, Molekular- und Mikrobiologie. Er arbeitet als Wissenschaftsautor in Halver.

Was jedes Gehirn einzigartig macht

Warum entwickeln eineiige Zwillinge trotz identischen Erbguts unterschiedliche Persönlichkeiten? Neben Umwelteinflüssen sind dafür springende Gene verantwortlich. Sie fügen sich zufällig irgendwo in den DNA-Strang ein und beeinflussen so die Arbeitsweise der Nervenzellen im Gehirn.

Von Fred H. Gage und Alysson R. Muotri

Unser Gehirn enthält rund 100 Milliarden Nervenzellen, die Netzwerke mit einigen hundert Billionen Verknüpfungen bilden. Dieses neuronale Verschaltungsmuster variiert von Mensch zu Mensch, was zu Unterschieden im Denken, Lernen und Verhalten sowie in der Anfälligkeit für psychiatrische Erkrankungen führt.

Warum gleicht kein Gehirn dem anderen? Eine Rolle spielt zweifellos der spezielle Genmix, den wir von unseren Eltern geerbt haben. Doch auch eineiige Zwillinge unterscheiden sich merklich in ihren geistigen Leistungen und Verhaltensweisen. Ebenso weichen genetisch identische Zuchtmäuse in Lernfähigkeit, Ängstlichkeit und Anfälligkeit für Stress voneinander ab. Wieso?

Einen Teil der Erklärung liefern die im Lauf des Lebens gesammelten Erfahrungen. Sie können beispielsweise die Beständigkeit der Verbindungen zwischen einzelnen Neuronengruppen beeinflussen. Doch gibt es inzwischen deutliche Hinweise auf weitere Faktoren. Dazu gehören Prozesse, die früh in der Embryonalentwicklung oder später im Leben Mutationen verursachen oder die Aktivität der Gene verändern.

Einer davon ist das alternative Spleißen. Es bewirkt, dass ein und dasselbe Gen als Vorlage für zwei oder mehr unterschiedliche Proteine dienen kann – also jene Substanzen, die für die meisten Abläufe in der Zelle sorgen. Welches jeweils produziert wird, bestimmt die Eigenschaften des betreffenden Gewebes. Ein anderer Faktor besteht in epigenetischen Modifikationen der Erbsubstanz, welche die Aktivität einzelner Gene modulieren – und damit die Menge des zugehörigen Proteins –, ohne die Abfolge der elementaren DNA-Bausteine (Nukleotide) zu verändern, in der die Erbinformation selbst verschlüsselt ist.

In den vergangenen Jahren sind wir beide aber noch auf einen dritten Faktor gestoßen: springende Gene. Solche mobilen DNA-Stücke, die sich bei allen höheren Organismen finden, können Kopien von sich selbst an beliebigen Stellen in das Genom (die Gesamtheit der Erbsubstanz im Zellkern) einfügen. Das ändert manchmal die Verhaltens- oder Funktionsweise der betroffenen Zelle. Im Gehirn scheinen springende Gene häufiger aktiv zu sein als in anderen Geweben. Dadurch können sie kognitive Fähigkeiten, Persönlichkeitsmerkmale und die Anfälligkeit für neurologische Erkrankungen in einem gewissen Ausmaß beeinflussen.

Als wir das Treiben der springenden Gene im Gehirn entdeckten, stellte sich uns sofort eine grundsätzliche Frage: Wenn die einwandfreie Funktion unseres Denkorgans kritisch für unser Überleben ist, warum toleriert die Evolution dann einen Mechanismus, der das genetische Programm der Neurone unkontrolliert abwandelt? Zwar haben wir immer noch keine endgültige Erklärung, doch vieles spricht dafür, dass springende Gene dem Gehirn eine Variabilität verleihen, dank der es sich schneller an veränderte Umweltbedingungen anpassen kann. Sie haben sich demnach im Lauf der

AUF EINEN BLICK

GENE MIT WANDERLUST

1 Neben Erbanlagen und Umwelt beeinflussen auch andere Faktoren unser Verhalten. Dazu zählen so genannte **Retrotransposonen**: mobile genetische Elemente, die Kopien von sich an einer zufälligen Stelle ins Genom einfügen können.

2 Manchmal schalten sie dabei Gene in ihrer neuen Umgebung aus oder ein. Das trägt dazu bei, dass sich selbst **eineiige Zwillinge** mit identischem Erbgut in Aussehen und Verhalten unterscheiden.

3 Solche Kopiervorgänge finden besonders häufig im Gehirn statt, wo sie **kognitive Funktionen** beeinflussen. Dadurch können wir möglicherweise rascher auf veränderte Umweltbedingungen reagieren. Retrotransposonen scheinen aber auch an der Entstehung psychischer Erkrankungen beteiligt zu sein.

Kein Fingerabdruck ist wie der andere. Genauso stimmen keine zwei Gehirne in Aufbau und Funktion völlig überein.

Evolution erhalten, weil der Überlebensvorteil durch die höhere Anpassungsfähigkeit die Risiken überwiegt.

Bekannt sind mobile genetische Elemente schon ziemlich lange. Sie wurden bereits in Pflanzen entdeckt, bevor James Watson und Francis Crick 1953 die Doppelhelixstruktur der DNA aufklärten. In den 1940er Jahren beobachtete Barbara McClintock vom Cold Spring Harbor Laboratory (US-Bundesstaat New York), dass bei äußerem Stress im Erbgut von Mais »Steuerelemente« von einer Stelle zu einer anderen hüpfen und dadurch Gene an- oder abschalten können. McClintocks Maiskolben mit den kunterbunt gesprenkelten Körnern sind ein Paradebeispiel für eine genetische Mosaikbildung. In diesem Fall unterscheidet sich das Genaktivitätsmuster einer Zelle von dem ihrer Nachbarn im selben Gewebe.

»**Springende Gene** verleihen dem Gehirn eine **Variabilität**, dank der es sich schneller an veränderte Umweltbedingungen anpassen kann«

McClintock, die für ihre zunächst stark angezweifelte Entdeckung 1983 den Medizinnobelpreis erhielt, erforschte so genannte Transposonen, die sich selbst »transponieren«, also versetzen können, indem sie sich aus dem Genom heraustrennen und an anderer Stelle wieder einfügen. Mobile genetische Elemente, welche stattdessen nur Kopien von sich selbst an einer anderen Position ins Genom einbauen, heißen dagegen Retrotransposonen.

Diese sind im menschlichen Erbgut extrem häufig: Fast die Hälfte unseres Genoms besteht daraus. Dagegen machen die insgesamt etwa 25 000 wirklich wichtigen Gene, die für Proteine kodieren, nicht einmal zwei Prozent unserer DNA aus. Springende Gene sind Relikte eines primitiven molekularen Replikationssystems, das sich schon vor Urzeiten im Erbgut der Eukaryonten (Organismen, deren Zellen einen echten Kern besitzen) eingenistet hat. Sie galten lange als funktionsloser DNA-Schrott, bis eine Forschergruppe unter Haig H. Kazazian jr. von der University of Pennsylvania 1988 herausfand, dass sie nicht nur einfach mitgeschleppt werden, sondern aktiv springen – und das auch beim Menschen.

Ein besonders aktiver Selbstkopierer

Ein spezielles Retrotransposon, das L1-Element (oder LINE-1 für Long Interspersed Element 1, langes eingestreutes Element 1), spielt im menschlichen Genom wohl eine Schlüsselrolle. Es kann sehr häufig seine Position wechseln – wahrscheinlich weil es im Gegensatz zu anderen die Bauanleitung für die Maschinerie zur Verbreitung von Kopien gleich mit sich führt.

Wird ein L1-Element im Genom aktiv, entsteht zunächst ganz normal eine Abschrift davon in Form einer einzelsträngigen Boten-RNA. Diese wandert aus dem Kern ins Zytoplasma und dient dort als Vorlage zur Synthese der Proteine, die in der L1-DNA verschlüsselt sind. Auch das ist noch nicht ungewöhnlich. Die betreffenden Eiweißstoffe bilden dann jedoch – und darin besteht die Besonderheit – mit der noch intakten RNA einen Molekülkomplex, der in den Zellkern zurückkehrt. Dort angelangt, zerschneidet eines der Proteine, eine so genannte Endonuclease, die DNA an einer zufälligen Stelle. Unterdessen synthetisiert ein anderes Enzym, die reverse Transkriptase, nach der RNA-Vorlage ein doppelsträngiges DNA-Duplikat des ursprünglichen L1-Retrotransposons, das sich schließlich an der Schnittstelle ins Genom einfügt. Eine gewisse Berühmtheit hat die reverse Transkription von RNA in DNA durch das Aidsvirus HIV erlangt. Es fertigt ebenfalls eine DNA-Kopie seines RNA-Genoms an und baut diese ins Erbgut der infizierten Zelle ein.

Die Retrotransposition verläuft oft fehlerhaft, so dass unvollständige, funktionslose Kopien der L1-DNA entstehen. Außerdem haben die neu eingefügten L1-Schnipsel oder kompletten L1-Duplikate in vielen Fällen keinen Einfluss auf die Aktivität proteinkodierender Gene. Doch manchmal ändern sie die Funktion eines solchen Erbfaktors.

Das L1-Duplikat kann beim Einfügen zum Beispiel mitten in der Bauanleitung für ein Protein landen. Diese wird dadurch meist unbrauchbar, was die Funktion der Zelle in aller Regel beeinträchtigt. Ab und zu entsteht aber ein abgewandeltes Protein, was dem Organismus gewöhnlich ebenfalls schadet, manchmal aber auch nutzt. Vielfach landet die neu eingefügte Sequenz allerdings außerhalb eines Gens. Hier kann sie unter Umständen als Promotor wirken: als Schalter, der nahe gelegene Gene aktiviert. Dadurch erhöht sich das Ausmaß, in dem sie abgelesen und die zugehörigen Proteine hergestellt werden. Auch das kann wieder positive oder negative Auswirkungen auf die Zelle und den Organismus insgesamt haben.

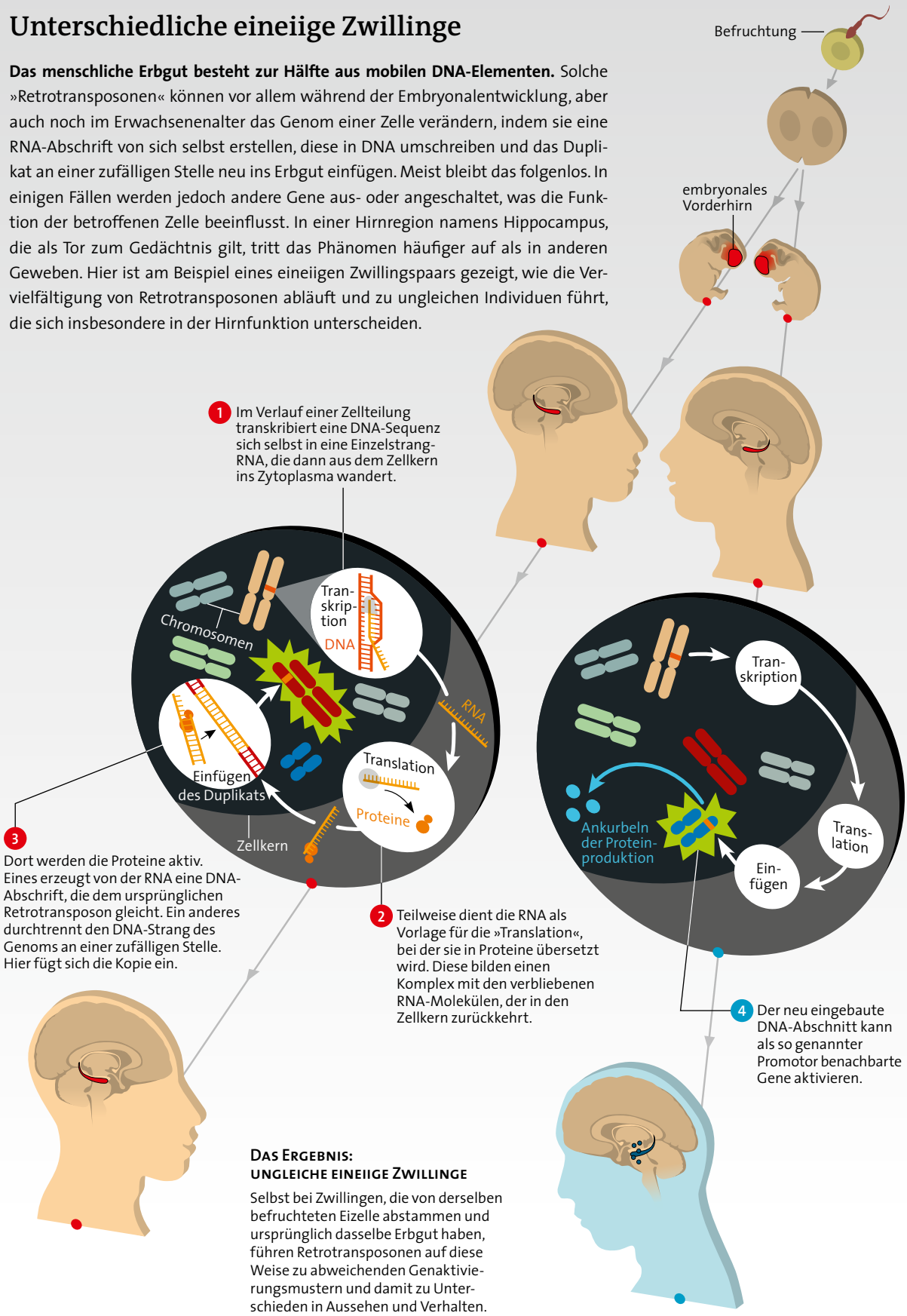
Bauen sich L1-Retrotransposonen an vielen verschiedenen Stellen in das Genom von Neuronen ein und geschieht das in vielen solchen Zellen, sollte sich die Gehirnfunktion dadurch merklich verändern. Es erscheint daher plausibel, dass die genetische Mosaikbildung Verhalten, Denkprozesse und Erkrankungsrisiken beeinflusst – weshalb zum Beispiel ein Zwilling gesund bleibt, während der andere an Schizophrenie erkrankt.

Bis vor Kurzem waren die meisten Forscher der Auffassung, L1-Elemente würden nur in Keimbahnzellen (Samen- oder Eizellen) umherwandern, aus denen bei der Befruchtung neue Embryonen hervorgehen. Zwar gab es Hinweise, wonach sie auch in normalen (»somatischen«) Körperzellen aktiv bleiben – vor allem während der Embryonalentwicklung. Doch diese Befunde stießen auf Skepsis. Da Gene ihre eigene Verbreitung fördern müssen, um sich auf Dauer halten zu können, brächte es mobilen DNA-Elementen nichts, in somatischen Zellen Kopien von sich ins Genom einzufügen; denn diese geben ihre Erbinformation nicht an die Nachkommen des Organismus weiter, sondern sterben mit ihm ab.

Mit empfindlichen Methoden gelang in den vergangenen Jahren jedoch der eindeutige Nachweis, dass Retrotransposo-

Unterschiedliche eineiige Zwillinge

Das menschliche Erbgut besteht zur Hälfte aus mobilen DNA-Elementen. Solche »Retrotransposonen« können vor allem während der Embryonalentwicklung, aber auch noch im Erwachsenenalter das Genom einer Zelle verändern, indem sie eine RNA-Abschrift von sich selbst erstellen, diese in DNA umschreiben und das Duplikat an einer zufälligen Stelle neu ins Erbgut einfügen. Meist bleibt das folgenlos. In einigen Fällen werden jedoch andere Gene aus- oder angeschaltet, was die Funktion der betroffenen Zelle beeinflusst. In einer Hirnregion namens Hippocampus, die als Tor zum Gedächtnis gilt, tritt das Phänomen häufiger auf als in anderen Geweben. Hier ist am Beispiel eines eineiigen Zwillingspaars gezeigt, wie die Vervielfältigung von Retrotransposonen abläuft und zu ungleichen Individuen führt, die sich insbesondere in der Hirnfunktion unterscheiden.



Das Ergebnis: ungleiche eineiige Zwillinge

Selbst bei Zwillingen, die von derselben befruchteten Eizelle abstammen und ursprünglich dasselbe Erbgut haben, führen Retrotransposonen auf diese Weise zu abweichenden Genaktivierungsmustern und damit zu Unterschieden in Aussehen und Verhalten.

JEN CHRISTIANSEN

nen auch in somatischen Zellen – während der Embryonalentwicklung und sogar noch später im Leben – Kopien von sich im Genom verteilen. Dies geschieht im Gehirn offenbar häufiger als in anderen Geweben – im Widerspruch zu der lange gehegten Ansicht, die DNA aller Hirnzellen eines Erwachsenen sei identisch und bleibe bis zum Tod unverändert.

In unserem Labor am Salk Institute for Biological Studies in La Jolla (Kalifornien) untersuchten wir beispielsweise die Aktivität von Retrotransposonen in genmanipulierten Mäusen, deren Zellen grün fluoreszieren, sobald sich ein L1-Element irgendwo im Körper ins Genom einbaut. Bei diesen Experimenten beobachteten wir das verräterische Leuchten erwartungsgemäß in Keimbahnzellen, aber auch in bestimmten Hirnregionen (Bild rechts). Zu diesen zählte insbesondere der Hippocampus, der für Gedächtnis und Aufmerksamkeit eine wichtige Rolle spielt. Interessanterweise waren die L1-Elemente besonders in den Vorläuferzellen aktiv, aus denen Neurone des Hippocampus hervorgehen.

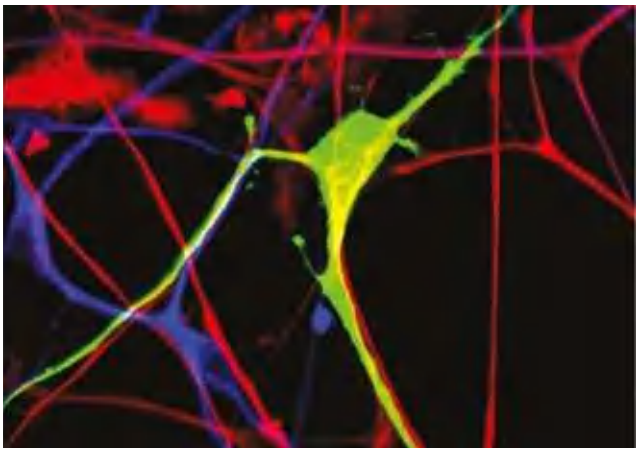
In mehreren Organen ausgewachsener Lebewesen gibt es solche unreifen Zellen, die sich bei Bedarf – etwa bei der Wundheilung – teilen und spezialisieren, um abgestorbenes Gewebe zu ersetzen. Der Hippocampus gehört zu einer von zwei Hirnregionen, in denen sich auch bei Erwachsenen neue Neurone bilden. Die L1-Elemente sind im Gehirn also nicht nur während der Embryonalentwicklung aktiv, wenn massenhaft neue Nervenzellen entstehen, sondern auch später.

Auf der Suche nach Belegen für Retrotranspositionen im menschlichen Gehirn bestimmten wir die Anzahl der dort vorhandenen L1-Elemente bei Verstorbenen. Tatsächlich waren es deutlich mehr pro Zelle als in Herz und Leber, die wir zum Vergleich heranzogen.

Die meisten Gensprünge müssen bereits im Mutterleib und in den ersten Lebensjahren stattgefunden haben; denn eine Retrotransposition ist ausschließlich während einer Zellteilung möglich, die im Gehirn nach der frühen Kindheit nur noch in zwei eng umschriebenen Regionen vorkommt. Unserer Zählung nach enthält das Genom jedes menschlichen Neurons im Durchschnitt 80 neue Kopien des L1-Elements. Diese erstaunlich hohe Zahl könnte ein erhebliches Maß an Variabilität zwischen verschiedenen Individuen verursachen, was die Funktionsweise einzelner Hirnzellen und die Aktivität des gesamten Denkorgans betrifft.

Forschungsergebnisse, über die Wissenschaftler vom Roslin Institute bei Edinburgh (Schottland) vor einem Jahr in der Fachzeitschrift »Nature« berichteten, bestätigen die Transpositionsaktivität von L1-Elementen im menschlichen Gehirn. Bei drei Verstorbenen fanden sich in den Genomen von Zellen des Hippocampus und des Nucleus caudatus, der ebenfalls an Gedächtnisfunktionen mitwirkt, an insgesamt 7743 Stellen neu eingefügte L1-Elemente. Dieses Ergebnis lässt erahnen, wie groß die im Verlauf des Lebens erzeugte genetische Diversität im menschlichen Gehirn ist.

Das Team vom Roslin Institute entdeckte zu seiner großen Überraschung auch rund 15 000 Kopien einer anderen Klasse von Retrotransposonen, die als SINE-Elemente (»kurze eingestreute Elemente«) bekannt sind. Die häufigsten gehören zur Gruppe der so genannten Alu-Sequenzen und waren noch nie zuvor als im Gehirn aktiv beschrieben worden.



COUFAL, N. G. ET AL.: L1 RETROTRANSPOSITION IN HUMAN NEURAL PROGENITOR CELLS. IN: NATURE 460, S. 1127–1131, 2009, FIG. 1G

Die grüne Fluoreszenz eines Mäuseneurons zeigt an, dass sich in dieser Zelle das Duplikat eines mobilen DNA-Elements an einer neuen Stelle im Genom eingebaut hat.

Angesichts dieser Forschungsergebnisse fragten wir uns, was die L1-Elemente in Körperzellen zum Springen veranlasst. Zwei Dinge wussten wir: Im Hippocampus entstehen das gesamte Leben hindurch neue Neurone, und diese Neurogenese wird bei Mäusen durch unbekannte Situationen und körperliche Aktivität angeregt. Deshalb vermuteten wir in sportlicher Betätigung auch einen möglichen Auslöser für die Retrotransposition. Tatsächlich verdoppelte sich die Zahl der grün fluoreszierenden Zellen im Hippocampus unserer Mäuse, wenn sie längere Zeit im Laufrad rannten.

Da auch neue Erfahrungen und Anforderungen die Neurogenese fördern, dürften diese Faktoren ebenfalls die Retrotransposition ankurbeln. Wenn aber die Sprunghäufigkeit von L1-Elementen bei Lernprozessen und Anpassungen an veränderte Umweltsituationen zunimmt, dann unterliegen die neuronalen Netze des Gehirns einem stetigen Wandel.

Schattenseite psychische Erkrankungen

Auf der Suche nach Belegen für die Hypothese, dass springende Gene zur Variabilität menschlicher Hirnfunktionen beitragen, wollten wir die Transposition eines solchen Elements auch an lebenden Menschen anhand der Folgen nachweisen. Das fällt leichter, wenn die Auswirkungen negativ sind, weil sie dann deutlicher ins Auge springen. Fündig wurden wir beim Rett-Syndrom: einer schweren Störung der Gehirnentwicklung im Kleinkindalter, die fast ausschließlich bei Mädchen auftritt. Als Ursache erkannte Huda Zoghbi vom Howard Hughes Medical Institute in Chevy Chase (Maryland) schon 1999 Mutationen in einem Gen namens *MeCP2*.

Das warf zahlreiche Fragen zum molekularen und zellulären Mechanismus dieser Erkrankung auf, denen wir mit unseren Untersuchungen nachgingen. Wie sich dabei herausstellte, sorgt eine bestimmte *MeCP2*-Mutation dafür, dass

sich in den Gehirnen betroffener Mäuse und Menschen mehr L1-Elemente in die DNA einbauen. Demnach könnten die springenden Gene zumindest teilweise für die Symptome verantwortlich sein.

Auch bei Schizophreniepatienten fand sich eine erhöhte L1-Aktivität im Stirnlappen der Großhirnrinde. Zudem existieren indirekte Hinweise, wonach L1-Elemente bei diversen seelischen Störungen eine Rolle spielen, etwa dem Autismus. Erkenntnisse darüber, wie mobile genetische Elemente an der Entstehung psychischer Erkrankungen mitwirken, könnten somit neue Möglichkeiten zur Diagnose und Therapie solcher Leiden eröffnen und Wege aufzeigen, ihnen vorzubeugen.

Künftige Forschungen zu springenden Genen im Gehirn werden vielleicht sogar einer ganzen Wissenschaftsdisziplin den Boden entziehen. Verhaltensforscher stützen sich gern auf langfristige Beobachtungen an eineiigen Zwillingen, um ohne Störung durch genetische Effekte die Rolle von Umwelteinflüssen auf die Entstehung von Krankheiten wie der Schizophrenie zu ergründen. Wenn aber springende Gene das Erbgut auch nach der Embryonalentwicklung noch modifizieren, erscheint zweifelhaft, ob eineiige Zwillinge wirklich in allen Zellen dasselbe Genom haben. Das macht es noch schwieriger, die Effekte von Vererbung und Umwelt auf unsere Psyche zu unterscheiden.

Am Schluss möchten wir zu der Frage zurückkehren, weshalb springende Gene als potenziell schädlicher Ballast nicht durch die natürliche Auslese beseitigt wurden. Während der langen Entwicklungsgeschichte des Lebens haben Viren und andere Eindringlinge zum Zweck der eigenen Verbreitung das Genom unserer Vorfahren mit sich kopierenden Genen immer weiter aufgebläht. Warum ließ die Evolution das zu? Über die Antwort können wir nur Vermutungen anstellen. Vielleicht attackierten die Schmarotzer das Genom einfach so häufig und massiv, dass es nicht gelang, sie völlig zu eliminieren. Ein Teil konnte sich so dauerhaft einnisten. Diese Störenfriede wurden dann mit raffinierten Mechanismen stillgelegt und entwaffnet. Offenbar haben es unsere Genome in einigen Fällen sogar geschafft, die L1-Retrotransposonen für ihre eigenen Zwecke einzuspannen. Dies könnte erklären, warum Zellen ihnen unter bestimmten Umständen erlauben, zusätzliche Kopien ins Genom zu integrieren.

Ein möglicher Hinweis auf die Gründe für das Fortbestehen von L1-Elementen ergab sich jüngst aus der genaueren Analyse von Experimenten mit Mäusen eines genetisch homogenen Stamms, die unter völlig gleichartigen Bedingungen aufwuchsen und trotzdem teils stark in ihren Stressreaktionen differierten. Die beobachteten Unterschiede im Verhalten ergaben eine Häufigkeitsverteilung, die einer gaußschen Glockenkurve entsprach und für Zufallsereignisse typisch ist. Demnach sind die Mechanismen, die der Variabilität zu Grunde liegen, vom Zufall gesteuert – was allem Anschein nach auch auf die Sprünge der L1-Elemente im Genom zutrifft.

In diesem Fall würfelt die Natur gewissermaßen und setzt darauf, dass die positiven Effekte nützlicher Einfügungen die negativen Auswirkungen der anderen überwiegen. In den Vorläuferzellen der Hippocampusneurone geschieht das bei neuen Erfahrungen besonders häufig. Dadurch steigt die Chance, dass zumindest einige der ins Genom eingebauten L1-Kopien Neurone hervorbringen, mit deren Hilfe das Gehirn die ungewohnten Herausforderungen besonders gut bewältigen kann. Etwas Ähnliches geschieht übrigens im Immunsystem, wo durch Umarrangieren der DNA eine Vielzahl unterschiedlicher antikörperproduzierender Zellen entsteht, von denen nur jene für die Massenproduktion ausgewählt werden, deren Antikörper den Krankheitserreger am besten bekämpfen.

Um einen deutlichen Effekt hervorzurufen, genügen schon recht moderate Auswirkungen der L1-Einfügung in wenigen Neuronen. Wie Experimente ergaben, kann sich bei Nagern das Verhalten bereits ändern, wenn nur eine einzige Hirnzelle ein neues Signalmuster zeigt.

Es gibt ein weiteres Argument für unsere Hypothese: Die Abstammungslinie aller noch aktiven L1-Elemente im Genom des modernen Menschen entstand vor 2,7 Millionen Jahren – also nach der evolutionären Trennung zwischen zweibeinig laufenden Hominiden und Schimpansen und etwa zu der Zeit, als unsere Vorfahren begannen, Steinwerkzeuge herzustellen. Vielleicht haben diese springenden Gene dazu beigetragen, dass die Frühmenschen Gehirne entwickelten, die Informationen über ihre Umwelt rasch verarbeiten können. Dadurch vermochten sie sich flexibler an variable Daseins- und Klimabedingungen anzupassen. Die L1-Elemente schufen also möglicherweise die Grundlage für die rasante und überaus erfolgreiche Evolution des *Homo sapiens*.

DIE AUTOREN

Fred H. Gage (links) interessiert sich als Professor im Genetiklabor am Salk Institute for Biological Studies in La Jolla (Kalifornien) vor allem für die Frage, wie sich Nervenzellen im Gehirn bilden. **Alysson R. Muotri** ist Assistenzprofessor in der Abteilung für Pädiatrie sowie für zelluläre und molekulare Medizin an der University of California in San Diego. Er hat von 2002 bis 2008 als Postdoc in Gages Labor gearbeitet.

QUELLEN

Coufal, N. G. et al.: L1 Retrotransposition in Human Neural Progenitor Cells. In: Nature 460, S. 1127–1131, 2009

Singer, T. et al.: LINE-1 Retrotransposons: Mediators of Somatic Variation in Neuronal Genomes? In: Trends in Neurosciences 33, S. 345–354, 2010. Online erhältlich unter: **www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2916067/?tool=pubmed**

WEBLINKS

www.scientificamerican.com/mar2012/jumping-genes
Video über die Versuche von Gage mit springenden Genen

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1159802**

Streit um die Prostatakrebs-Früherkennung

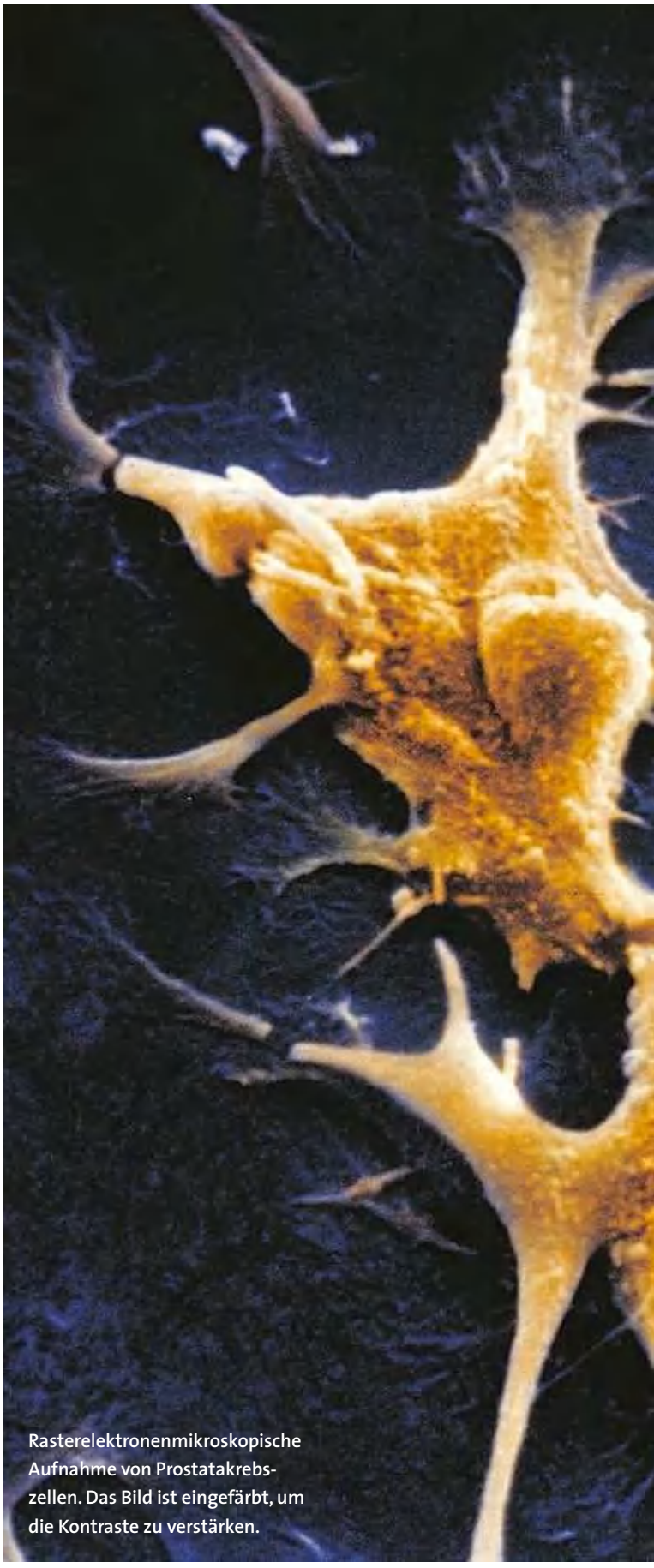
Schaden PSA-Tests zur Früherkennung von Prostatakrebs mehr, als sie nutzen? Immer mehr Studien lassen die aktuellen Vorsorgemaßnahmen zwiespältig erscheinen.

Von Marc B. Garnick

Im vergangenen Herbst ließ die amerikanische »Preventive Services Task Force« eine Bombe platzen. Das Expertengremium, das die US-Regierung in Gesundheitsfragen berät, empfahl gesunden Männern, nicht mehr an PSA-Tests zur Früherkennung von Prostatakrebs teilzunehmen. Denn diese Messungen des Blutspiegels an prostataspezifischem Antigen (PSA) hätten als Instrument zur Krebsvorsorge nur wenig oder gar keinen Nutzen. Statt Leben zu retten, führten sie nur dazu, dass hunderttausende Männer unnötig operiert oder bestrahlt würden – mit Nebenwirkungen wie Impotenz, Inkontinenz und Rektalblutungen.

Die amerikanischen Experten schätzen, dass seit 1985 mehr als eine Million Männer auf Grund eines positiven PSA-Tests an der Prostata behandelt wurden. Mindestens 5000 von ihnen starben kurz nach dem Eingriff, weitere 300 000 wurden impotent, inkontinent oder beides. Kurz nachdem die Task Force diese alarmierenden Zahlen veröffentlicht hatte, hagelte es empörte Kommentare von medizinischen Fachgesellschaften. Auch die American Urological Association, ein amerikanischer Berufsverband von derzeit mehr als 18 000 Urologen, äußerte Kritik.

Die Kontroverse ist nicht neu – schon seit Langem debattieren Experten über den Nutzen des PSA-Tests. Trotzdem tendiert die öffentliche Meinung in den USA immer noch dahin, seinen massenhaften Einsatz zu befürworten. Als internistischer Onkologe, der sich auf Prostatakrebs spezialisiert hat, stimme ich der Einschätzung der Task Force jedoch in den wesentlichen Punkten zu. Vielen medizinischen Laien ist nicht klar, wie schwach die Belege sind, die für den PSA-Test als Instrument zur Krebsfrüherkennung sprechen. Er liefert zwar nützliche Informationen – aber erst, nachdem ein Prostatakrebs diagnostiziert wurde. Zudem wissen nur wenige, dass bei der medizinischen Behandlung des Prosta-



Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Prostatakrebszellen. Das Bild ist eingefärbt, um die Kontraste zu verstärken.

PHOTO RESEARCHERS / PARVIZ M. POUR

takarzinoms häufig Komplikationen auftreten, trotz ausgefeilter Therapieformen, die zumindest unter Befürwortern als besonders fortschrittlich gelten.

Eine weitere Kontroverse betrifft die Frage, ob und wann diejenigen Patienten behandelt werden sollen, die unzweifelhaft an Prostatakrebs erkrankt sind. Auch hier sprechen die vorliegenden Daten für einen deutlichen Kurswechsel – weg von aggressiven Soforteingriffen und hin zu einem vorsichtigeren, individuell angepassten Vorgehen. Die Ursache für diesen Sinneswandel liegt in der Erkenntnis, dass eine Prostatakrebserkrankung von Patient zu Patient sehr unterschiedlich verlaufen kann. Die möglichst frühzeitige Therapie ist deshalb nicht das Patentrezept, für das viele Ärzte, ich einbegriffen, sie lange Zeit gehalten haben.

Sowohl die PSA-Messung als auch die heutigen Therapien gegen Prostatakrebs sind mit grundlegenden Problemen behaftet. Eine Reihenuntersuchung zum frühzeitigen Erkennen von Krankheiten – ein so genanntes Screening – liefert im Idealfall nur bei den Patienten ein positives Ergebnis, die unbehandelt tatsächlich die Symptome der Erkrankung ausbilden würden. Dementsprechend sollte ein perfektes Prostatakrebs-Screening ausschließlich Tumoren identifizieren, die ohne medizinischen Eingriff zu gesundheitlichen Problemen führten. Die betroffenen Männer könnten anschließend therapiert werden, wobei der Eingriff im besten Fall sowohl hocheffektiv wäre als auch keine ernsthaften Nebenwirkungen hätte. Wenn beides vorläge – ideales Screening und ideale Therapie –, dann wäre es in der Tat angezeigt, so viele Männer wie möglich zu testen und alle zu behandeln, bei denen der Test positiv ausfällt.

Doch davon sind wir weit entfernt. Ein positiver PSA-Test bedeutet nicht, dass der Patient ein Prostatakarzinom hat, sondern nur, dass er eins haben könnte. Das prostataspezifische Antigen (PSA) ist ein Protein, das von der Prostata produziert und der Samenflüssigkeit beigemischt wird. Normalerweise fällt seine Konzentration im Blut verschwindend gering aus. Sie kann aber aus verschiedenen Gründen ansteigen, etwa bei einer altersbedingten gutartigen Vergrößerung der Prostata, im Zuge einer Infektion, nach sexueller Aktivität – oder eben auf Grund des Wachstums eines bösartigen Prostatatumors.

Wenn der PSA-Test wiederholt ein positives Ergebnis liefert, entnimmt der Arzt Gewebe aus der Prostata, um es zu untersuchen. Diese so genannte Biopsie ist unangenehm und bringt gewisse Risiken mit sich, stellt aber noch nicht das eigentliche Problem dar. Denn sie erlaubt es immerhin festzustellen, ob sich in der Prostata des Patienten ein bösartiger Tumor gebildet hat oder nicht. Das wirkliche Dilemma besteht darin, dass die Mediziner nicht erkennen können, ob ein so gefundener Tumor gefährlich ist oder ob er dem Betroffenen zeitlebens nie Probleme bereiten wird.

Im fortgeschrittenen Alter erkrankt die Prostata fast immer

Studien zufolge haben mehr als die Hälfte der amerikanischen Männer, die zwischen 50 und 60 Jahre alt sind, Prostatakrebs. Bei den Männern über 80 sind es sogar mehr als drei Viertel. Die Mehrzahl von ihnen stirbt jedoch nicht an dem Tumorleiden, sondern an anderen Erkrankungen. Bei wem ist eine Behandlung unbedingt geboten und bei wem völlig unnötig? Die Ärzte wissen es in der Regel nicht.

Diese Unklarheit wäre hinnehmbar, wenn die Therapie keine Risiken mit sich brächte. Denn dann könnte man viele behandeln, um das Leben weniger zu retten. Leider sieht die Realität jedoch anders aus. Denn in unmittelbarer Nähe der Prostata liegen Enddarm, Harnblase und Penis. Das macht es schwierig, hier zu operieren oder zu bestrahlen, ohne die benachbarten Organe zu beschädigen.

Eine chirurgische Entfernung der Prostata führt oft zu Inkontinenz, da der Arzt den Blasenausgang von der Harnröhre trennen muss. Zwar verbindet er die beiden Strukturen später wieder, doch kommt es während solcher Eingriffe immer wieder zu Schäden am Schließmuskel, der die Blasenentleerung kontrolliert. Zudem können die Nerven und Blutgefäße, die für die Erektionsfunktion verantwortlich sind, versehentlich durchtrennt werden, was den Patienten impotent macht. Angeblich treten solche Komplikationen bei roboterassistierten Operationen seltener auf, doch fehlen bislang große, unabhängige Studien, die das klar belegen.

Auch eine Bestrahlung der Prostata kann Impotenz zur Folge haben. Zusätzlich lauert hier die Gefahr, dass Enddarm und Harnblase Schaden nehmen, da sie von der kaum vermeidbaren Streustrahlung getroffen werden. Blutungen aus dem Enddarm und ungewollter Stuhlabgang sind häufige Nebenwirkungen der Strahlentherapie, die generell zu selten dokumentiert werden. Sie treten auch nach dem Einbringen kleiner radioisotopenhaltiger Nadeln oder Körner, so genannter Seeds, in die Prostata auf, sowie nach chirurgischen Eingriffen. Schließlich stehen zur Behandlung des Prostatakarzinoms noch diverse medikamentöse Verfahren zur Auswahl – Hormon-, Immun- und Chemotherapien –, die ebenfalls Nebenwirkungen haben. Dazu zählen der Verlust

AUF EINEN BLICK

GEFÄHRLICHE VORSORGE?

1 Der **PSA-Test** lässt sich als Reihenuntersuchung an gesunden Männern einsetzen, um möglichst frühzeitig Prostatakrebs zu erkennen. Groß angelegte Studien lassen jedoch Zweifel daran aufkommen, ob hierdurch das Risiko, an Prostatakrebs zu sterben, wirklich sinkt.

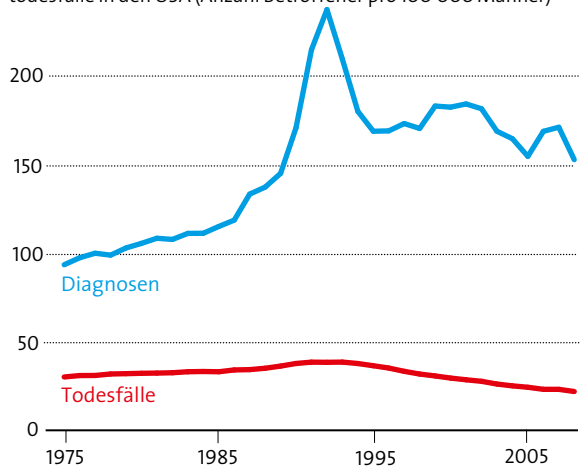
2 Bei hunderttausenden Männern hat ein positives Testergebnis zu unnötigen Behandlungen mit **schweren Nebenwirkungen** geführt. Ärzte und Gesundheitsexperten streiten deshalb darüber, ob das PSA-Screening als Instrument der Krebsfrüherkennung sinnvoll ist.

3 Ein guter Kompromiss könnte darin bestehen, am **Screening** festzuhalten, die Therapie eines dabei entdeckten Prostatakarzinoms jedoch so lange aufzuschieben, bis der Krebs sich als tatsächlich gefährlich erweist.

Ernüchternde Daten

In den 1990er Jahren führte der verbreitete Einsatz des PSA-Screenings zu einem dramatischen Anstieg der Tumordiagnosen in den USA (blau). Bald darauf ging die Zahl der Todesfälle durch Prostatakrebs zurück (rot). Doch das zeitliche Zusammentreffen dieser beiden Trends beweist noch keinen ursächlichen Zusammenhang. Tatsächlich zeigten zwei große, prospektive Studien aus dem Jahr 2009, dass das PSA-Screening die Gefahr, an Prostatakrebs zu sterben, wenig oder überhaupt nicht senkt. Der Rückgang der Todesfälle könnte auf Veränderungen der Lebensgewohnheiten beruhen oder auf dem zunehmenden Einsatz von cholesterinsenkenden Arzneistoffen, so genannten Statinen. Deren entzündungshemmende Wirkung könnte vor Prostatakrebs schützen.

Veränderungen in der Zahl der Protatakrebsdiagnosen und -todesfälle in den USA (Anzahl Betroffener pro 100 000 Männer)



JEN CHRISTIANSEN, NACH: SEER CANCER STATISTICS REVIEW 1975–2008, NATIONAL CANCER INSTITUTE

des Sexualtriebs, Impotenz, Gewichtszunahme, Knochenschwund, Hitzewallungen sowie Störungen der Herz- und Leberfunktion. Deshalb sollte der Arzt deshalb immer sämtliche Risiken sorgfältig gegen den möglichen Nutzen abwägen.

Seit einiger Zeit mehren sich die Erkenntnisse, die gegen den Einsatz des PSA-Tests in der Krebsfrüherkennung sprechen. Bereits 2008 empfahl die Preventive Services Task Force, dass Männer über 75, die keine Prostatabeschwerden haben, nicht damit untersucht werden sollten. Denn die vorliegenden Daten hatten ergeben, dass Prostatakrebspatienten dieser Altersgruppe mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht an ihrem Tumorleiden sterben, sondern aus anderen Gründen.

Nur ein Jahr später zeigten die Ergebnisse zweier sehr großer Erhebungen – der europäischen »ERSPC«- und der amerikanischen »PLCO«-Studie –, dass dies auch für jüngere Männer gelten könnte. In beiden Studien teilten die Forscher gesunde Männer zwischen 50 und 74 Jahren per Zufall in zwei Gruppen ein (insgesamt lag die Teilnehmerzahl bei rund 250 000). Die erste Gruppe nahm regelmäßig an Früherkennungstests teil, entweder mittels PSA-Messung oder mittels Tastuntersuchung, also dem Befühlen der Prostata durch den Arzt. Lieferten die Tests ein auffälliges Ergebnis, wurden Biopsien vorgenommen, und falls darin Krebszellen erkennbar waren, empfahl der Arzt in der Regel eine Therapie. Die zweite Gruppe bekam kein regelmäßiges Screening angeboten, erhielt jedoch die übliche medizinische Versorgung, falls notwendig. Wenn ein Mann aus dieser Gruppe etwa Probleme beim Wasserlassen hatte – ein möglicher Hinweis auf Prostatakrebs –, wurde er entsprechend inspiziert und behandelt.

Am Ende des Untersuchungszeitraums analysierten die Forscher beide Gruppen im Hinblick auf folgende Aspekte: Lebten die Männer, die an regelmäßigen Vorsorgetests teilgenommen hatten, länger als jene der Vergleichsgruppe? Und starben sie seltener an Prostatakrebs als diese? Die erste Frage beantworteten beide Studien mit einem klaren Nein. Bezüglich der zweiten Frage fiel die Antwort mehrdeutig aus. Die europäische Erhebung ergab bei den Männern, die am Screening teilnahmen, ein um 20 Prozent geringeres Risiko, an Prostatakrebs zu sterben. Die US-Untersuchung hingegen zeigte auch in dieser Hinsicht keinen Unterschied zwischen den beiden Gruppen.

Viele unnötige Eingriffe

In der europäischen Studie ermittelten die Forscher zudem, wie viele Patienten getestet und behandelt werden müssen, um einen Todesfall durch Prostatakrebs zu verhindern. Dieses Verhältnis zu kennen, ist sehr wichtig, um den Nutzen eines Screenings zu bewerten. Laut den Berechnungen ist es erforderlich, 1400 Männer zu untersuchen und 48 davon zu behandeln, um einem Todesfall vorzubeugen. Das bedeutet, dass 47 Patienten eine Therapie mit zweifelhaftem Nutzen erhalten, die bei vielen erhebliche Nebenwirkungen zeitigt. Zusätzlich fragwürdig erscheint das Screening, bedenkt man, dass sich die Gesamtsterblichkeit zwischen den regelmäßig untersuchten Männern und der Vergleichsgruppe nicht unterschied.

Allerdings müssen wir Vorsicht walten lassen, wenn wir diese Studien interpretieren. Denn die Daten zeigen zwar recht eindeutig, dass die meisten gesunden Männer ohne Prostatabeschwerden keine regelmäßigen Früherkennungsuntersuchungen benötigen. Doch bei Patienten mit einem Familienangehörigen, der vor dem 70. Lebensjahr an Prostatakrebs gestorben ist, erscheint die regelmäßige Messung des PSA-Werts gerechtfertigt. Sie besitzen möglicherweise eine ererbte Veranlagung, die das Erkrankungsrisiko erhöht. In einigen Jahren wird es vielleicht möglich sein, besonders gefährdete Männer mit genetischen Tests zu identifizieren, um sie in einem speziellen Vorsorgeprogramm zu betreuen.

Einer meiner Patienten, Herr H., nahm bereits vor 16 Jahren den heutigen Standpunkt der Preventive Services Task Force ein. 1996 war bei ihm im Alter von 54 Jahren ein PSA-Test positiv ausgefallen und anschließend Prostatakrebs diagnostiziert worden. Er konsultierte viele Spezialisten, darunter auch mich, und alle rieten ihm zur Therapie. Trotzdem lehnte er jegliche Behandlung ab, denn nach dem Studium der verfügbaren Fachliteratur war er zu dem Schluss gekom-

men, es sei unwahrscheinlich, dass er in absehbarer Zukunft an dem Krebs sterben würde. Zudem ging er davon aus, dass nach einigen Jahren des Wartens neue, wirksamere Therapien zur Verfügung stehen würden. Er gewöhnte sich lediglich eine gesündere Lebensweise an und nahm ab. Jahr für Jahr, nachdem er diese mutige Entscheidung getroffen hatte, gab ich meinem Patienten erneut den Rat, sich behandeln zu lassen. Und jedes Mal lehnte er ab.

Heute geht es dem inzwischen 70-Jährigen immer noch sehr gut. Weder wurde er operiert noch bestrahlt noch mit Medikamenten behandelt, trotzdem hat sein Tumor nicht gestreut. Sein PSA-Wert ist in dieser Zeit von 7 auf 18 Einheiten gestiegen – eine ausgesprochen gemächliche Zunahme, die darauf schließen lässt, dass der Krebs sehr langsam wächst. Der Verzicht auf eine Therapie war offenkundig richtig. Indem Herr H. sich ausführlich informierte und unsere Ratschläge kritisch hinterfragte, konnte er eine gut begründete Entscheidung treffen. So vermied er es, den ungewissen Nutzen einer frühzeitigen Behandlung mit ihren fast sicheren Folgeschäden zu erkaufen.

Tatsächlich beruhten die ärztlichen Therapieempfehlungen zu der Zeit, als Herr H. erstmals in meiner Sprechstunde erschien, nicht etwa auf hochwertigen klinischen Studien, sondern auf falschen Vorstellungen vom Verlauf einer Prostatakrebserkrankung. Wir wussten, dass manche Tumoren nur langsam wachsen, andere hingegen sich sehr aggressiv entwickeln. Doch es galt als ausgemacht, dass die weitaus meisten irgendwann metastasieren und somit unheilbar würden. Einen Krebs im Frühstadium zu entdecken und sofort zu bekämpfen, erschien damals als praktisch gleichbedeutend damit, ein Leben gerettet zu haben. Diese Logik liegt auch dem heutigen Prostatakrebs-Screening zu Grunde.

Tumorwachstum im Schneckentempo

Doch die Sterblichkeitsstatistiken der letzten 25 Jahre zeigen, dass die Angelegenheit komplizierter ist. Seit den 1990er Jahren geht die Zahl der Männer, die an Prostatakrebs sterben, zurück. Die Befürworter von Früherkennungsprogrammen führen dies auf den massenhaften Einsatz des PSA-Tests zurück – doch wie wir an den beiden prospektiven Studien aus Europa und den USA gesehen haben, steht diese Annahme auf wackligen Füßen. Zudem hätte die Prostatakrebssterblichkeit viel schneller und deutlicher sinken müssen, wenn sie wirklich auf Grund des PSA-Screenings abgenommen hätte. Tatsächlich scheinen unsere früheren Überzeugungen nicht korrekt gewesen zu sein. Wie wir inzwischen wissen, wachsen viele Prostatakarzinome extrem langsam, oft sogar praktisch gar nicht.

Forscher entdecken immer mehr Beispiele für Tumoren, die zunächst als bösartig eingestuft werden und doch so gemächlich wachsen, dass sie sich weder im Körper ausbreiten noch schwer wiegende klinische Symptome verursachen. Deshalb erwägen Mediziner bereits, ihnen eine besondere Bezeichnung zu geben – etwa »indolenter Tumor«, was soviel wie »träge Geschwulst« bedeutet. Dies soll unterstrei-

Situation in Deutschland

In der Bundesrepublik bieten die gesetzlichen Krankenkassen allen Männern ab 45 einmal jährlich eine Tastuntersuchung an, um Prostatakrebs möglichst früh zu erkennen. Dabei untersucht der Arzt die Genitalien und befühlt die Prostata, indem er einen Finger in den Enddarm einführt. Der PSA-Test ist nicht im gesetzlichen Früherkennungsprogramm enthalten – die Kosten dafür muss der Betroffene selbst tragen.

Zur Bewertung des PSA-Screenings gibt es unterschiedliche Stimmen. Die Deutsche Krebshilfe kommt zur Einschätzung, dass bei ihm »das Verhältnis von Nutzen und Schaden bislang nicht ausreichend bekannt« ist. Männer über 40 sollten sich umfassend über die Prostatakrebsfrüherkennung informieren und nach Beratung mit ihrem Arzt entscheiden, ob sie den Test nutzen wollen. Auch die aktuelle ärztliche Leitlinie zum Thema Prostatakarzinom äußert sich bezüglich des PSA-Screenings zurückhaltend: »Ein Einfluss auf die Gesamtüberlebenszeit ist nicht nachgewiesen.«

Die Deutsche Gesellschaft für Urologie empfiehlt allen Männern ab 40 die Bestimmung des PSA-Werts und eine Tastuntersuchung mit dem Finger. Sei in der Familie des Mannes bereits eine Prostatakrebserkrankung aufgetreten, dann sei eine jährliche Untersuchung ab dem 40. Lebensjahr mit Bestimmung des PSA-Werts dringend angeraten.

Der Krebsinformationsdienst (KID) des Deutschen Krebsforschungszentrums urteilt, dass der PSA-Test nach wie vor umstritten ist: Es stehe noch nicht fest, ob Männer länger und vor allem besser leben, wenn sie diese Untersuchung regelmäßig durchführen. Sei ein Mann bereits an einem Prostatakarzinom erkrankt, helfe der Test dagegen, die Behandlung zu planen und ihren Erfolg zu kontrollieren. Zusammen mit der Krankenversicherung AOK und der Universität Bremen hat der KID einen Onlinetest erstellt, der Männern die Entscheidung für oder gegen einen PSA-Test erleichtern soll: **www.psa-entscheidungshilfe.de**

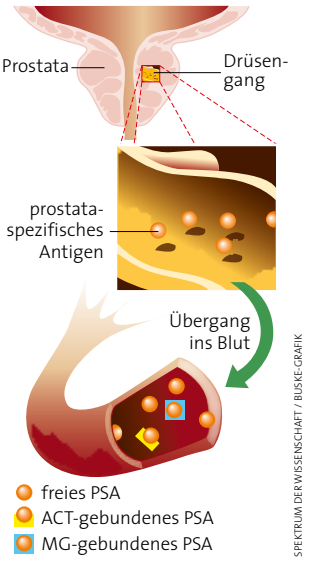
chen, dass die betroffenen Patienten für einen sehr langen Zeitraum unbehandelt bleiben können oder vielleicht sogar überhaupt keine Therapie benötigen. Zum Zeitpunkt der ersten Diagnose wissen wir zwar noch nicht, ob es sich um einen indolenten Tumor handelt, doch können wir seine weitere Entwicklung anhand seiner Eigenschaften recht gut abschätzen und in regelmäßigen Untersuchungen verfolgen.

Zugegeben: Eingeübte Gewohnheiten zu ändern, ist in der Medizin genauso schwer wie in anderen Lebensbereichen. Sicherlich wird es viele Ärzte und Patienten geben, die sich nicht damit wohlfühlen, auf das PSA-Screening zu verzichten, nachdem jahrelang das Gegenteil empfohlen wurde. Einige Patienten sind überdies fest überzeugt davon, dass die Vorsorgeuntersuchung ihr Leben gerettet hat. Wir sollten ihre medizinische Betreuung jedoch umgestalten, um sie vor unnötigen Behandlungen zu bewahren. Dazu müssen wir bei einem diagnostizierten Prostatakarzinom die Therapieentscheidung nur so lange aufschieben, bis wir einiger-

Mögliche Komplikationen

Zur Behandlung des Prostatakarzinoms zerstören die Ärzte das Tumorgewebe mittels Bestrahlung, oder sie entfernen die Prostata bei einem chirurgischen Eingriff. Auch Immun-, Chemo- oder Hormontherapien werden eingesetzt. Wegen der anatomischen Lage des Organs kommt es dabei häufig zu ernsten Nebenwirkungen. Die Prostata, die einen Teil der Samenflüssigkeit produziert, sitzt direkt am Ausgang der Harnblase und unmittelbar vor dem Enddarm. Zudem verlaufen ganz in der Nähe Nervenstränge, die die Erektion steuern. Operation und Bestrahlung können deshalb zu Komplikationen wie Harninkontinenz und unkontrolliertem Stuhlabgang, Impotenz und rektalen Blutungen führen. Zu den Nebenwirkungen medikamentöser Therapien gehören der Verlust des Sexualtriebs, Impotenz, Gewichtszunahme, Knochenschwund, Hitzewallungen sowie Störungen der Herz- und Leberfunktion.

BRYAN CHRISTIE



Die Prostata produziert das prostataspezifische Antigen (PSA) und mischt es über ihre Ausführungsgänge dem Sperma bei. Aus verschiedenen Gründen – etwa bei Prostatakrebs – kann PSA auch ins Blut gelangen. Dort liegt es in freier Form vor oder ist an verschiedene Plasmaproteine gebunden, etwa an Antichymotrypsin (ACT) oder Makroglobulin (MG).

maßen genau wissen, ob wir es mit einer aggressiven, potenziell tödlichen Erkrankung zu tun haben oder mit einem indolenten Tumor.

Viele meiner Prostatakrebspatienten haben sich gegen einen sofortigen Eingriff entschieden und erhalten keinerlei Therapie. Stattdessen nehmen sie an einem Programm teil, das als »aktives Beobachten« bezeichnet wird – sie lassen regelmäßig ihren PSA-Wert messen und Prostatabiopsien durchführen. Eine Therapie kommt in Betracht, wenn der PSA-Wert rasch steigt, die Biopsie ein beschleunigtes Tumorwachstum anzeigt oder die Einordnung des Tumorgewebes gemäß der Gleason-Klassifikation ergibt, dass die Krebszellen deutlich aggressiver geworden sind. Kürzlich kamen Experten im Auftrag der National Institutes of Health zu der Einschätzung, das aktive Beobachten sei »eine brauchbare Option, die Patienten mit einem Niedrigrisiko-Prostatakarzinom angeboten werden sollte«. Und eine in Kanada durchgeführte Langzeitstudie hat ergeben, dass etwa ein Prozent der Patienten, die sich für diese Option entscheiden, innerhalb von zehn Jahren an der Krebserkrankung sterben. Zum Vergleich: Bei der chirurgischen Entfernung der Prostata beträgt das Risiko tödlicher Komplikationen etwa 0,5 Prozent.

Die Entscheidung gegen eine Therapie ist nicht endgültig. Operation, Bestrahlung und andere Therapien stehen auch später noch zur Verfügung, und die vorliegenden Studiendaten zeigen, dass der Aufschub der Behandlung das klinische Resultat nicht verschlechtert. Für die Patienten, bei denen irgendwann tatsächlich ein Eingriff erforderlich wird, eignen sich dann möglicherweise neue Behandlungsansätze, die nur den erkrankten Teil der Prostata entfernen und deshalb weniger Nebenwirkungen haben. Tragfähige Studien zum Vergleich mit konventionellen Verfahren sind jedoch noch nicht abgeschlossen.

Für die vier Prozent der amerikanischen Patienten, bei denen der Tumor bereits in die Knochen oder andere Organe gestreut hat, gibt es noch keine Therapie, die zur vollständigen Heilung führt. Aber die verfügbaren Behandlungen werden allmählich effektiver. Gängige Eingriffe zielen darauf ab, die Wirkung des Testosterons zu unterbinden, um das Wachstum der Tumoren zu hemmen. Es gibt jedoch stets einige Krebszellen, denen es irgendwann gelingt, diese chemische Kastration zu überwinden. Deshalb hat die amerikanische Arzneimittelzulassungsbehörde FDA (Food and Drug Administration) vor Kurzem zwei neue Therapieverfahren zur Behandlung des fortgeschrittenen Prostatakarzinoms bewilligt. Bei dem einen handelt es sich um den therapeutischen Krebsimpfstoff Provenge, der die Immunreaktion gegen den Tumor verstärken soll (siehe SdW 3/2012, S. 24). Die zweite neu zugelassene Therapie basiert auf dem Arzneistoff Abirateron, der die Tumorzellen selbst an der Produktion von Testosteron hindert. Studien zu beiden Behandlungsansätzen zeigen, dass sie die Überlebenszeit der Patienten im Mittel um vier Monate verlängern. Weitere Verfahren sind in der Entwicklung.

In den mehr als anderthalb Jahrzehnten, seit Herr H. sich gegen eine Therapie entschied, haben wir viel über Prostatakrebs gelernt. Das ermöglicht uns heute, die medizinische Betreuung an die individuelle Situation des Patienten anzupassen, statt alle Betroffenen gleich zu behandeln. Wir Ärzte sollten zudem die Botschaft mitnehmen, dass wir sowohl uns selbst als auch unseren Patienten stets klarmachen müssen, über welche gesicherten Erkenntnisse wir tatsächlich verfügen und was wir nicht wissen. Und wir sollten den Mut haben, uns an der besten wissenschaftlichen Evidenz zu orientieren, statt etablierten Glaubensgrundsätzen zu folgen.

DER AUTOR

Marc B. Garnick ist Onkologe und Spezialist für Prostatakrebs. Er arbeitet an der Harvard Medical School und am Beth Israel Deaconess Medical Center, beide in Boston (USA). Gemeinsam mit Kollegen gibt er den Jahresbericht der Harvard Medical School über Prostataerkrankungen heraus. Der Autor berät außerdem mehrere Risikokapitalfirmen bei Investitionen in neu gegründete Unternehmen, die innovative Therapien gegen Prostatakrebs entwickeln.

QUELLEN

Chou, R. et al.: Screening for Prostate Cancer: A Review of the Evidence for the U.S. Preventive Services Task Force. In: Annals of Internal Medicine 155, S. 762–771, 2011

Garnick, M. B., MacDonald, A. (Hg.): 2012 Annual Report on Prostate Diseases. Harvard Health Publications, 2012

McNaughton-Collins, M. F., Barry, M. J.: One Man at a Time – Resolving the PSA Controversy. In: The New England Journal of Medicine 365, S. 1951–1953, 2011

WEBLINKS

www.krebsinformationsdienst.de
Das Deutsche Krebsforschungszentrum informiert ausführlich rund um Krebs und seine Früherkennung.

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1159803**

Jetzt im Handel

Dieses Heft spricht Ihnen aus der Seele.

Heft 8,50 € –
mit DVD 15,90 €*

* Heft ohne DVD: 8,50 € (A: 9,80 €/CH: 17,60 sfr).
Heft mit DVD: 15,90 € (A: 17,90 €/CH: 33,00 sfr).

www.geokompakt.de

Man kann nie genug wissen. GEOkompakt

MATTHEW LANE

Unter Wasser fällt es leichter, länger als eine Minute nicht zu atmen. Wer fünf Minuten schaffen will, braucht aber besondere Vorbereitungen.

PHYSIOLOGIE

Warum ist **Luftanhalten** so schwer?

Nicht Sauerstoffmangel oder Kohlendioxidüberschuss im Blut zwingen uns zum unwillkürlichen Luftholen, nachdem wir einige Zeit den Atem angehalten haben. Im Verdacht stehen vielmehr Signale vom Zwerchfell an das Gehirn.

Von Michael J. Parkes

Lange den Atem anzuhalten fällt schwer. Gemeinhin gelingt das nicht einmal eine Minute lang. Was zwingt uns, selbst gegen unseren Willen, zum nächsten Atemzug? Überraschenderweise kennen Physiologen die Antwort noch nicht. Sie haben aber einen Verdacht.

Ein Erwachsener, der sich ausruht, holt in der Minute ungefähr zwölfmal Luft. Das geschieht normalerweise völlig automatisch. Die Atmung gehorcht dann einem inneren Rhythmus – dem Atemzyklus –, der genauso lebenswichtig und unverzichtbar ist wie die Taktgebung des Herzschlags. Wir müssen nicht bewusst mithelfen, wenn das Gehirn das Luftholen genau auf die körperlichen Bedürfnisse abstimmt. Doch anders als beim Herzschlag können wir, wenn wir wollen, den Atem eine gewisse Zeit anhalten, zum Beispiel um kein Wasser oder keinen Staub in die Lunge zu bekommen, um den Brustkorb vor einer Kraftleistung zu stabilisieren oder um länger in einem Zug zu sprechen. Auch das gelingt im normalen Alltag mühelos, ohne dass wir darüber nachdenken.

Tiere konnte noch niemand dazu bringen, die Luft freiwillig mehr als ein paar Sekunden lang anzuhalten, obwohl alle Säuger das unter manchen Umständen tun. Wissenschaftliche Experimente auf dem Gebiet sind deswegen nur am Menschen möglich. Allerdings verbieten sich wegen des gesundheitlichen Risikos viele theoretisch denkbare Versuche. Früher waren manche Forscher jedoch wenig zimperlich und erzielten mitunter interessante Ergebnisse, von denen einige zum Verständnis dessen beitragen, was physiologisch beim Luftanhalten abläuft. Ein praktisches Ziel solcher Forschungen heute besteht darin, medizinische Behandlungen zu erleichtern, die sich bei angehaltenem Atem besser durchführen lassen, so etwa zielgenaue Bestrahlungen bei Brustkrebs.

Schon um 1930 beschrieb Edward C. Schneider, ein Wegbereiter solcher Studien, wie eine geübte Versuchsperson bei geeigneter Vorbereitung mittels ausgefeilter Techniken geschlagene 15 Minuten und 13 Sekunden die Luft anzuhalten vermochte. Auf ähnliche Weise brachte es 1959 der Physiologe Hermann Rahn (1912–1990) von der University at Buffalo (ebenfalls im Staat New York) im Selbstversuch auf fast 14 Minuten. Unter anderem hatte er für einen verlangsamten Stoffwechsel gesorgt, vorher hyperventiliert und reinen Sauerstoff geatmet.

Weshalb reichen wir gewöhnlich nicht entfernt an solche Leistungen heran? Bei Raumluft unter Atmosphärendruck geben die meisten Menschen, selbst wenn sie vorher noch so tief einatmen, spätestens nach einer Minute auf. Dabei enthält die volle Lunge genug Sauerstoff für vier Minuten. Und auch die Kohlendioxidkonzentration – genauer gesagt der Partialdruck des Atemgases – im Blut erreicht so schnell keinen kritischen Wert.

Unter Wasser gelingt Luftanhalten besser. Vielleicht spielt dabei mit, dass man kein Wasser in die Lunge bekommen möchte. Inwieweit Menschen den klassischen Tauchreflex besitzen, über den viele Vögel und Säugetiere verfügen, ist noch nicht geklärt. Bei diesen Arten fährt beim Tauchen der Stoffwechsel herunter, und nur die lebensnotwendigen Organe werden noch mit frischem Blut versorgt.

Wie schon Schneider beobachtete und viele Laborstudien seither bestätigten, ist es zumindest unter den Verhältnissen auf Meereshöhe unmöglich, absichtlich so lange nicht zu atmen, bis man ohnmächtig umkippt, weil das Gehirn nicht mehr genug Sauerstoff erhält. Zu den wenigen Ausnahmen gehören Wettbewerbe im Extremtauchen. Angeblich gab es auch Einzelfälle, bei denen Kinder den Atem bis zur Bewusstlosigkeit angehalten haben. Doch im Allgemeinen lässt uns ein unwillkürlicher innerer Mechanismus nach Luft schnappen, lange bevor der Sauerstoff nicht mehr reicht oder sich zu viel Kohlendioxid gebildet hat. Was uns allerdings jenseits eines Grenzpunkts (englisch: break point) – dem von Atemforschern benutzten Ausdruck – unwiderstehlich zum Atemholen zwingt, ist schwer zu erkennen.

Denkbar wäre, dass spezielle Messfühler im Körper die physiologischen Veränderungen beim Luftanhalten überwachen und rechtzeitig Alarm schlagen. In Frage kämen etwa Sensoren, die eine übermäßig lang andauernde Dehnung von Lunge und Brust registrieren. Eine Rolle könnten auch spezielle Fühler spielen, die niedrige Sauerstoff- oder überhöhte Kohlendioxidkonzentrationen im Blut oder im Gehirn erfassen. Tatsächlich wirken solche Sensoren an der Regulierung des normalen Atmens mit. Doch was das Luftanhalten betrifft, ließ sich bisher kein Zusammenhang mit ihnen nachweisen.

Der Beteiligung von Volumensensoren in der Lunge sind mehrere Forscher nachgegangen. Zu ihnen zählen Helen R. Harty und John H. Eisele vom Londoner Charing Cross Hospital, die dort bei dem Atemforscher Abe Guz arbeiteten, sowie Patrick A. Flume, damals an der University of North Carolina in Chapel Hill. Seit den 1960er Jahren haben sie unabhängig voneinander zahlreiche experimentelle Studien zu der Frage durchgeführt. Wie sie feststellten, vermögen Empfänger einer fremden Lunge, bei denen die Nervenverbindungen zwischen dem transplantierten Organ und dem Gehirn durchtrennt sind, die Luft nicht ungewöhnlich lange anzuhalten. Ebenso wenig gelingt das Patienten bei einer Spinalanästhesie, bei der unter anderem die Sinnesrezeptoren der Brustmuskulatur blockiert werden. Wohlgemerkt erfasste die Betäubung bei den Versuchen nicht das Zwerchfell – ein für unsere Fragestellung wichtiger Umstand.

Ebenso können anscheinend sämtliche bekannten Chemorezeptoren für Sauerstoff und Kohlendioxid, die beim normalen Atmen mitwirken, als Verursacher des unwiderstehlichen Drangs zum Luftschnappen ausgeschlossen werden. Soweit bekannt, besitzt der Mensch Sensoren für einen niedrigen Blutsauerstoffgehalt einzig in den beiden Hals- oder Kopfschlagadern, den Karotiden. Diese Strukturen liegen an deren Gabelung in jeweils einen vorderen und hinteren Ast – etwas oberhalb vom Kehlkopf. Dort befinden sich auch Messfühler, die einen erhöhten Kohlendioxidwert melden. Der wird außerdem von Rezeptoren im Hirnstamm erfasst. Dieses Hirngebiet steuert die regelmäßige Atmung sowie andere nicht willentlich beeinflusste Körperfunktionen.

Wiederholter Atemverzicht trotz Sauerstoffmangel

Würden Sauerstoffrezeptoren den unbezwingbaren Atemdrang am Grenzpunkt veranlassen, dann müssten Menschen die Luft bis zur Bewusstlosigkeit anhalten können, wenn diese Rückmeldung ausfällt. Das Team von Karlman Wasserman an der University of California in Los Angeles hat das an Patienten überprüft, bei denen die betreffenden Nervenbahnen zwischen den Halsarterien und dem Hirnstamm durchtrennt waren. Tatsächlich holten diese aber stets frühzeitig von allein wieder Luft.

Wenn besagter Grenzpunkt allein vom Partialdruck des Sauerstoffs und/oder Kohlendioxids abhängen würde, müsste es dem Menschen außerdem unmöglich sein, über kritische Blutwerte hinaus die Luft anzuhalten. Doch das vermag er durchaus, wie eine Reihe von Versuchen zeigte, bei denen Forscher die geatmeten Gase manipulierten. Ebenso wenig könnte dann jemand die Luft gleich ein zweites Mal lange anhalten, bevor sich die Atemgasspiegel im Blut wieder normalisiert haben.

Dass dies ohne Weiteres gelingt, hatten Forscher schon Anfang des 20. Jahrhunderts per Zufall entdeckt. 1954 untersuchte Ward S. Fowler von der Mayo Clinic in Rochester (Minnesota) das Phänomen dann genauer. Die Probanden erhielten nach dem ersten Luftanhalten ein Gasgemisch mit sehr wenig Sauerstoff. Trotzdem konnten sie das Atmen sofort wieder unterdrücken – was sie ohne Schwierigkeiten sogar noch ein drittes Mal schafften, obwohl die Blutwerte nun schon ziemlich schlecht wurden. Weiteren Studien zufolge ist es dabei völlig gleichgültig, wie oft oder stark jemand dazwischen sauerstoffarme Luft eingesogen hat. Es spielte also keine Rolle, ob die Versuchsperson kräftig oder nur einmal

AUF EINEN BLICK

ERZWUNGENES ATEMHOLEN

1 Viel eher als physiologisch nötig geben wir beim Luftanhalten auf, weil der **Drang zum Atmen** übermächtig wird.

2 Forscher sind dem Grund dafür nachgegangen, indem sie verschiedene Muskeln oder Nerven betäubten. Wie sich dabei zeigte, scheint das **Zwerchfell** die entscheidende Rolle zu spielen.

3 Dieser wichtigste Atemmuskel schickt offenbar Informationen über Dauer und Grad seiner Anspannung an das Gehirn. Deren Beachtung können wir beim Luftanhalten zunächst durch **Willenskraft** unterdrücken.

4 Doch irgendwann gewinnt der nie ruhende, im Stammhirn generierte **natürliche Atemrhythmus** die Oberhand. Mit Übung und Tricks lässt sich dieser Zeitpunkt immerhin hinausschieben.

Zwerchfell im Verdacht

Beim Luftanhalten gibt es einen »Grenzpunkt«, an dem der Drang zum Ausatmen unwiderstehlich wird. Die Zeit, bis er auftritt, lässt sich zwar durch Übung sowie durch Manipulation der Atemgase verlängern. Doch weiß niemand bisher wirklich, welcher Mechanismus dahintersteckt – was also seinen Zeitpunkt bestimmt.

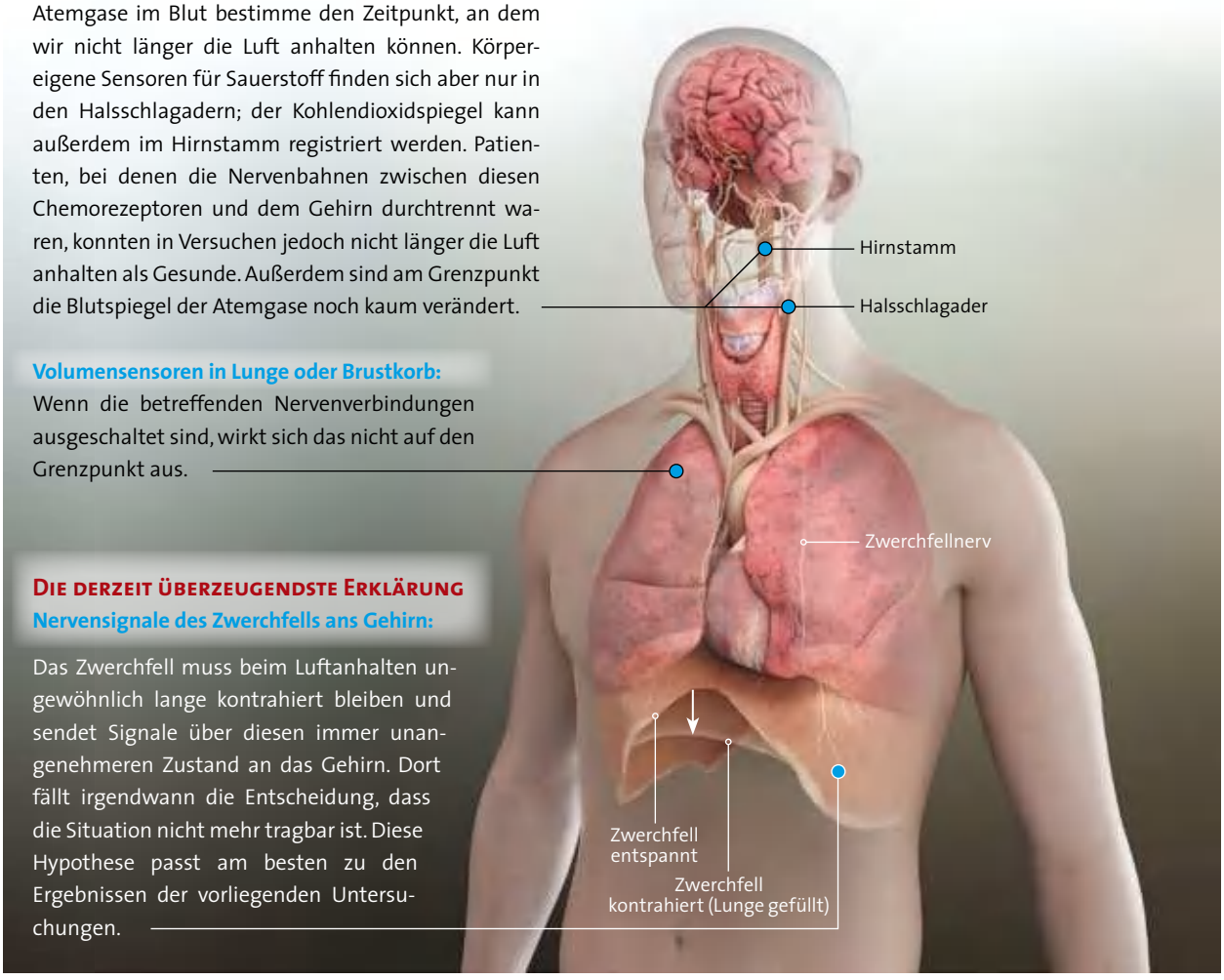
Ausgeschlossene Hypothesen

Chemorezeptoren für Blutwerte:
Die Vermutung liegt nahe, die Konzentration der Atemgase im Blut bestimme den Zeitpunkt, an dem wir nicht länger die Luft anhalten können. Körpereigene Sensoren für Sauerstoff finden sich aber nur in den Halsschlagadern; der Kohlendioxidspiegel kann außerdem im Hirnstamm registriert werden. Patienten, bei denen die Nervenbahnen zwischen diesen Chemorezeptoren und dem Gehirn durchtrennt waren, konnten in Versuchen jedoch nicht länger die Luft anhalten als Gesunde. Außerdem sind am Grenzpunkt die Blutspiegel der Atemgase noch kaum verändert.

Volumensensoren in Lunge oder Brustkorb:
Wenn die betreffenden Nervenverbindungen ausgeschaltet sind, wirkt sich das nicht auf den Grenzpunkt aus.

Die derzeit überzeugendste Erklärung

Nervensignale des Zwerchfells ans Gehirn:
Das Zwerchfell muss beim Luftanhalten ungewöhnlich lange kontrahiert bleiben und sendet Signale über diesen immer unangenehmeren Zustand an das Gehirn. Dort fällt irgendwann die Entscheidung, dass die Situation nicht mehr tragbar ist. Diese Hypothese passt am besten zu den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchungen.



schwach geatmet hatte. 1974 zeigten John R. Rigg und Moran Campbell von der McMaster University in Hamilton (Ontario, Kanada) schließlich, dass ein mehrfaches Luftanhalten direkt nacheinander selbst dann möglich ist, wenn man dazwischen nur zu atmen versucht, es aber nicht tun kann, weil Mund und Nase verschlossen sind.

Demnach scheint der Gasaustausch nicht der unmittelbare Grund für den unwiderstehlichen Drang zum Luftholen zu sein. Was käme stattdessen in Frage? Nach tiefem Einatmen, bei dem sich die beteiligten Muskeln kontrahieren, hat der Brustkorb die Tendenz, von allein wieder einzusinken – es sei denn, man hält ihn aktiv gedehnt. Liegt in dieser Anspannung vielleicht der Schlüssel dafür, dass wir den Atem nur eine begrenzte Zeit anhalten können? Stecken hinter dem automatischen Luftholen irgendwelche neuronalen oder mechanischen Kontrollmechanismen, welche die Atemmuskeln ohne unser Wollen entspannen und dann neuerlich aktivieren? Das führt zugleich zu der Frage, was beim Luftanhalten mit unserem unwillkürlichen Atemrhythmus geschieht. Läuft er weiter, auch wenn wir verhindern, dass ihm die Muskeln gehorchen?

Eine Hauptrolle beim unwillkürlichen normalen Atmen spielt das Zwerchfell – eine Bezeichnung, die sich von den alten deutschen Wörtern für »quer« (twerah) und für »Haut« ableitet. Beim Ausatmen entspannt es sich und wölbt sich nach oben. Beim Einatmen zieht es sich zusammen und

wird flach. Dadurch dehnt es die Lunge Richtung Bauchraum (siehe Kasten S. 39). Ein normaler Atemzyklus beginnt mit Nervenimpulsen vom Atemzentrum im Hirnstamm. Sie gelangen über den rechten und linken Zwerchfellnerv zum Zwerchfell, das sich daraufhin kontrahiert. Offenbar existiert ein zentraler neuronaler Mechanismus, der diesen Befehl rhythmisch, also für jeden Atemzug, generiert.

Diesen Mechanismus beim Menschen direkt zu untersuchen, etwa durch elektrische Ableitungen am Hirnstamm oder an den Zwerchfellnerven, verbietet sich aus ethischen Gründen und ist bisher auch technisch unmöglich. Allerdings kann man ihn indirekt erkennen – über die elektrische Aktivität in der Zwerchfellmuskulatur, den Druck in Atemwegen und Lunge sowie bestimmte Reaktionen des autonomen Nervensystems. Zum Beispiel schwankt der Herzschlagrhythmus beim Atmen etwas: Beim Einatmen wird er ein wenig schneller, beim Ausatmen langsamer.

Zwerchfell an Gehirn: Luftschnappen angesagt

An solchen Effekten erkannte Emilio Agostoni von der Universität Mailand 1963, dass das Atemzentrum auch während des Luftanhaltens Impulse zu geben scheint. Tatsächlich setzt dieser innere Signalgeber offenbar nie aus, wie 2003 und 2004 die Doktorandin Hannah E. Cooper, der Anästhesist Thomas H. Clutton-Brock und ich an der University of Birmingham mit ähnlichen Messungen zeigten.

Beim Luftanhalten unterdrücken wir anscheinend nur die Reaktion des Zwerchfells auf einen neuerlichen solchen Befehl und halten es weiter angespannt. Andere Muskeln und Strukturen, die beim normalen Atmen mitwirken, scheinen nach allen bisherigen Befunden nicht beteiligt zu sein. Das könnte auch bedeuten: Über den Zeitpunkt des unwillkürlichen Luftschnappens entscheidet eine sensorische Rückmeldung vom Zwerchfell ans Gehirn – etwa über die Dauer seiner Anspannung oder die Stärke seiner Beanspruchung.

In diesem Fall müssten Menschen, deren Zwerchfell gelähmt ist, so dass es keine Signale an das Gehirn zu schicken vermag, die Luft viel länger anhalten können, vielleicht im Prinzip sogar unbegrenzt. Einen in der Tat atemberaubenden Versuch dazu wagte Moran Campbell Ende der 1960er Jahre am Londoner Hammersmith Hospital mit zwei gesunden Versuchspersonen. Sie willigten ein, bei vollem Bewusstsein eine intravenöse Injektion mit Curare zu erhalten, dem Pfeilgift südamerikanischer Indianer. Die Substanz lähmte ihre gesamte Skelett- und auch die Atemmuskulatur – bis auf einen Arm, bei dem die Hauptarterie abgebunden worden war. Die Probanden erhielten eine Atemmaske, in die ein Ventilator sauerstoffreiche Luft blies. Zur Simulation des Luftanhaltens wurde er abgestellt. Die Teilnehmer sollten mit dem Arm ein Zeichen geben, sobald sie wünschten, dass er wieder angeschaltet würde, weil sie den unwiderstehlichen Drang zum Luftholen verspürten.

Nur – sie gaben kein Signal. Offenbar fühlten sie sich wohl, und nach ungefähr vier Minuten brach der überwachende Anästhesist ab, weil der Kohlendioxidspiegel in ihrem Blut kritische Werte erreichte. Nachher, als die Lähmung verschwunden war, erzählten beide Versuchspersonen, sie hätten kein Erstickungsgefühl verspürt und auch sonst nichts Unangenehmes empfunden.

Ganz wenige Male nur trauten sich Forscher später, das tollkühne Experiment zu wiederholen. Seltsamerweise konnten sie das Ergebnis von Campbell dabei nicht bestätigen. Ihre Probanden vermeldeten den unwiderstehlichen Drang zum Luftholen stets schon sehr früh, als der Kohlendioxidspiegel im Blut noch kaum gestiegen war. Vielleicht fanden sie den Beatmungsschlauch, der den Kehlkopf offen hielt –

Die Tricks der Profis

Manche Menschen, etwa Apnoetaucher, betreiben Luftanhalten trotz des damit verbundenen Risikos als Sport. Hauptsächlich wenden sie die folgenden Tricks an. Solche Versuche sollten aber nur unter ärztlicher Überwachung durchgeführt werden.

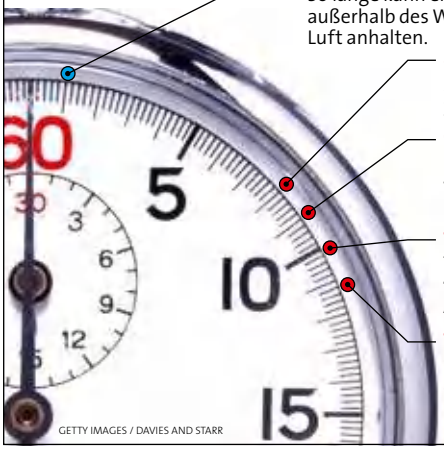
Übervolle Lunge:
Mit Pumpbewegungen des Mundbodens drückt man zusätzliche Luft in die vollgeatmete Lunge. Durch den so erzeugten Überdruck droht jedoch eine arterielle Luft- oder Gasembolie: Gasblasen in den Gefäßen können im Gehirn oder den Herzkranzgefäßen Schäden anrichten.

Verminderter Stoffwechsel durch tiefe Entspannung:
In Ruhe verbraucht der menschliche Körper etwa 0,36 Liter Sauerstoff pro Minute. Zwölf Stunden fasten und ganz ruhig liegen senkt den Verbrauch auf 0,27 Liter. Die Luft reicht dann ein Drittel länger.

Reinen Sauerstoff atmen:
Der Sauerstoffgehalt normaler Luft beträgt rund 21 Prozent. Mit reinem Sauerstoff kann man den Atem etwa doppelt so lange anhalten wie sonst. Eine Gefahr dabei ist, dass Teile der Lunge beim Ausatmen kollabieren.

Hyperventilieren:
Vorher mehrmals schnell ein- und auszuatmen, senkt den Kohlendioxidgehalt im Blut. Mancher kann die Luft dann doppelt so lange anhalten. Andererseits verbraucht man nun mehr Sauerstoff und bildet mehr Kohlendioxid. Bei Hyperventilation wird das Gehirn schlechter mit Blut versorgt, weil die notwendige Rückkopplung, die auf Kohlendioxidwerten beruht, nicht erfolgt.

Einige neuere Rekorde
(erzielt mit normaler Luft, reglos mit dem Gesicht nach unten im Wasser liegend)



GETTY IMAGES / DAVIES AND STARR

1:00 Minute
So lange kann eine ungeübte Person außerhalb des Wassers maximal die Luft anhalten.

8:06 Minuten
Martin Štěpánek
3. Juli 2001, Miami

9:04 Minuten
Herbert Nitsch
13. Dezember 2006, Hurghada (Ägypten)

10:12 Minuten
Tom Sietas
7. Juni 2008, Athen (Griechenland)

11:35 Minuten
Stéphane Mifsud
8. Juni 2009, La Crau (Frankreich)

eine Sicherheitsmaßnahme, auf die Campbell verzichtet hatte –, einfach zu unangenehm und wollten die Sache schnell hinter sich bringen. Vielleicht waren sie sich auch der Lebensgefahr stärker bewusst.

Weitere Hinweise darauf, dass eine Zwerchfelllähmung tatsächlich ein längeres Luftanhalten zulässt, lieferten jedoch weniger riskante Versuche von Mark I. M. Noble, die er zusammen mit anderen Forschern durchführte, als er in den 1970er Jahren bei Abe Guz in London arbeitete. Statt die gesamte Muskulatur zu lähmen, betäubte das Team nur die beiden Zwerchfellnerven, lähmte somit allein diesen Muskel. Tatsächlich konnten die Teilnehmer in diesem Fall den nächsten Atemzug etwa doppelt so lange wie sonst hinauszögern. Auch hatten sie ein weniger unangenehmes Gefühl als sonst.

Noch ein Tipp: Kopfrechnen!

Vieles spricht für die Vermutung, dass wir beim Luftanhalten nicht etwa den Atemzyklus stoppen, sondern gegen den inneren Rhythmus das Zwerchfell kontrahieren und mit dessen Hilfe den Brustkorb geweitet halten. Für das Zwerchfell ist das allerdings eine Ausnahmesituation. Man kann sich gut vorstellen, dass es entsprechende neuronale Signale ans Gehirn sendet. Dieses achtet zunächst nicht sehr darauf, so dass wir nur ein leicht unangenehmes Gefühl haben. Doch irgendwann stuft es die Situation als nicht mehr hinnehmbar ein. Dann ist der physiologische Grenzpunkt erreicht, an dem der automatische Atemrhythmus die Kontrolle zurückgewinnt. Übrigens hängt der Zeitpunkt auch von der momentanen Stimmung oder Motivationslage ab und lässt sich durch Ablenkung wie etwa Kopfrechnen hinauszögern.

Wohlgemerkt liefert dieser Deutungsansatz lediglich die einfachste übergreifende Erklärung für die vorliegenden Versuchsergebnisse. Einschränkend ist zu sagen, dass bei manchen der angeführten Studien die Teilnehmerzahl zu klein für verallgemeinernde Schlussfolgerungen war. Höchstwahrscheinlich wird man sie wegen ihrer Gefährlichkeit aber nicht wiederholen können. Auch lässt sich nicht ausschließen, dass noch entscheidende Mosaiksteinchen im Gesamtbild fehlen.

Zudem passt ein noch nicht erwähnter Befund bisher nicht recht zu der geschilderten Hypothese. Es geht um ein weiteres fragwürdiges Experiment von Noble und Guz. Bei drei gesunden Personen narkotisierten die Forscher zwei Hirnnerven: den Vagus, der an der Regulation vieler innerer Organe beteiligt ist, und den Zungen-Rachen-Nerv, der auch den Kehlkopf innerviert. Daraufhin konnten die Probanden die Luft dreimal so lange anhalten wie vorher. An sich sollte das Zwerchfell von der Betäubung verschont geblieben sein – es sei denn, über einen bisher unbekannten Seitenast des Vagus könnten auch von dort Signale ans Gehirn gelangen. Dass ein Kehlkopfmuskel beim Luftanhalten eine Rolle spielt, ist hingegen weniger wahrscheinlich: Wie der plastische Chirurg Martyn Mendelsohn aus Sydney 1993 mit einer eingeführten winzigen Kamera zeigte, bleibt die Stimmritze beim Luftanhalten gewöhnlich die ganze Zeit geöffnet.

Weshalb interessieren sich Mediziner überhaupt für die Grenzen des Luftanhaltens? Ein Grund ist, dass ein Patient in manchen Situationen ganz still liegen muss und nicht einmal atmen darf. Das gilt insbesondere für die Bestrahlung von Brusttumoren, die nur die Krebszellen töten, aber das angrenzende gesunde Gewebe möglichst verschonen soll. Eigentlich müsste der Patient dabei minutenlang die Luft anhalten, was aber nicht möglich ist. Deshalb gönnt man ihm zwischendurch immer wieder eine Atempause, für die man die Prozedur unterbricht. Danach kann der Tumor gegenüber dem Gerät aber jedes Mal etwas verschoben sein. Unterstützt von Stiftungen des Universitätskrankenhauses von Birmingham, prüfen der Medizinphysiker Stuart Green, die klinische Onkologin Andrea Stevens, Clutton-Brock und ich derzeit, ob es möglich ist, durch Maßnahmen, die ein längeres Luftanhalten erlauben, solche Bestrahlungstherapien zu verbessern.

Es gibt aber auch ganz handfeste Nutzanwendungen solcher Forschungen – etwa für Polizisten bei Verhaftungen. Wir wissen inzwischen, dass sich die Höchstdauer der Atemunterbrechung bei gesteigertem Stoffwechsel, zusammengepresstem Brustkorb, vermindertem Sauerstoff- und erhöhtem Kohlendioxidspiegel im Blut verringert. Das sollten Ordnungskräfte bedenken, wenn sie einen sich heftig wehrenden Menschen auf den Boden drücken. Ein Forscherteam um Andrew R. Cummin am Londoner Charing Cross Hospital führte dazu im Jahr 2000 Untersuchungen an acht gesunden Personen durch. Diese mussten eine Minute lang mäßig angestrengt Fahrrad fahren, dann maximal ausatmen – und nun die Luft anhalten. Länger als 15 Sekunden schaffte das niemand. Die Sauerstoffwerte im Blut sanken eklatant, und bei zwei Teilnehmern wurde der Herzschlag unregelmäßig. Das zeigt, wie wichtig es ist, bei solchen Festnahmen behutsam vorzugehen.

DER AUTOR

Michael J. Parkes lehrt angewandte Physiologie an der School of Sports and Exercise Sciences der University of Birmingham (England). Außerdem forscht er an der Wellcome Trust Clinical Research Facility, einer Einrichtung innerhalb des University Hospitals Birmingham NHS Foundation Trust.

QUELLEN

Agostoni, E.: Diaphragm Activity during Breath Holding: Factors Related to its Onset. In: Journal of Applied Physiology 18, S. 30–36, 1963

Parkes, M.J.: Breath-Holding and its Breakpoint. In: Experimental Physiology 91, S. 1–15, 2006

Shea, S.A.: Behavioural and Arousal-Related Influences on Breathing in Humans. In: Experimental Physiology 81, S. 1–26, 1996

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1159804**

Unser besonderer Tipp:

LERNPAKET EXPERIMENTE MIT DEM STIRLINGMOTOR

2012, Stirlingmotor, Generator, Steckbrett, 20 Bauteile und Handbuch, Franzis

Bestell-Nr. 3526 **€ 149,90**

Dieses Franzis-Lernpaket enthält ein voll funktionsfähiges Stirlingmotor-Modell, einen elektrischen Generator, ein Experimentiersteckbrett und viele weitere Elektronikbauteile. Damit können Sie Funktionsweise und Einsatzmöglichkeiten des Stirlingmotors praktisch erfahren und erforschen. Das Modell ist komplett vormontiert und kann nach dem Zusammenbau des Brenners sofort in Betrieb genommen werden. Dazu brauchen Sie nichts weiter als handelsüblichen Brennspiritus (nicht enthalten). Das Handbuch führt vom einfachen Bauteil zum fertigen Projekt. Die physikalischen Grundlagen und die unterschiedlichen Typen der Stirlingtechnik werden genau erklärt.

IPSOL 4/4S SOLAR

Ladeschale mit eingebautem 2400-mAh-Lithium-Polyme-Akku für Iphone 4/4S

mit Micro USB-Kabel, Farbe: schwarz, Inprosolar

Bestell-Nr. 3716 **€ 89,–**

Die Ladeschale verschmilzt mit dem iPhone zur einer Einheit. Sie ist sehr ergonomisch in der Handhabung und löst mit dem zusätzlichen Energiespeicher jedes Problem des täglichen Nachladens.

Und wenn mal keine Energie in beiden Speichern vorliegt, sorgt das Solarmodul für eine vernünftige Notstromversorgung: **1 Stunde in der Sonne laden ermöglicht 1 Stunde telefonieren.**

Bestellen +49 6221 9126-841
Sie direkt: @ info@science-shop.de

BRESSER VISIOMAR MICROSET 40X-1024X

Mikroskop-Set mit USB-Anschluss

Kunststoffkoffer, Staubschutzhülle, 230-V-Netzteil (5,5 V / 200 mA), Präparatebox mit 5 Dauerpräparaten; Objektträgern und Deckgläschen, Präparierbesteck, Garnelenbrutanlage, MikrOkular II mit Bildbearbeitungssoftware, Meade

Bestell-Nr. 3618 **€ 89,–**

Hochwertiges Schülermikroskop mit Barlow-Linsen-Zoom-System und PC-Okular

Ausgestattet mit einer Barlow-Linse, die die Vergrößerung des Mikroskops bis zu 1,6-fach steigert, ein MikrOkular I (PC-Okular mit 640 x 480 Pixel Auflösung), Ulead-Photo-Explorer-Bildbearbeitungssoftware, USB-Verbindungskabel, 2 optische Okulare und Netzadapter sowie weiterem nützlichen Starter-Zubehör wie: 5 Dauerpräparate, 10 Objektträger, 20 Deckgläser und Staubschutzhülle. Beobachtungsobjekte: Kleinorganismen, Insekten, Pflanzen, kleinere Mineralien.

NACHTSICHTGERÄT NIGHT EYE 3x42

Restlicht- und IR-Licht-Verstärker, Vergrößerung: 3-fach, Ø Objektiv: 42 mm. Benötigt wird eine CR123A-Batterie (nicht im Lieferumfang enthalten), Omegon

Bestell-Nr. 3655 **€ 199,–**

Das *Night Eye* ist ein Restlichtverstärker und funktioniert mit einem Bildwandler, der das Licht um das etwa 1000-Fache verstärkt. Ist Restlicht vorhanden, sind Beobachtungen bis zu 200 Meter Distanz möglich. Und bei absoluter Dunkelheit wird mit einem weiteren Knopfdruck der IR-Licht-Verstärker eingeschaltet. *Night Eye* ist kompakt und mit einer Hand bedienbar.

LEONARDO DA VINCI VITRUV MANN, HOLZBAUSATZ

13 Einzelteile, L x B x H: 210 x 210 x 290 mm, Maßstab: 1:16, Revell

Bestell-Nr. 3433
€ 29,95

Für viele war Leonardo der große Humanist der Renaissance. Er versuchte alles über den Menschen nachzuvollziehen – Proportionen, Funktionen und Emotionen. Seine berühmteste Studie hierzu ist der Vitruv-Mann. Er stellt ein echtes Stück Kunstgeschichte dar, das nun erstmals als Holzmodell erhältlich ist.

Die Wissensbecher aus hochwertigem Porzellan sind ein schönes und nützliches Geschenk!

Höhe: 105 mm; Inhalt: 460 ml, spülmaschinengeeignet, Könitz Porzellan

WISSENSBECHER MATHEMATIK
Bestell-Nr. 3430 **€ 9,95**

WISSENSBECHER PHYSIK
Bestell-Nr. 3431 **€ 9,95**

WISSENSBECHER CHEMIE
Bestell-Nr. 3432 **€ 9,95**

DON'T WORRY, BE HAPPY

Betonobjekt

Betonobjekt von Hand gegossen. Die in der Scheibe angedeuteten Mundwinkel können durch eine 180°-Drehung verändert werden, Größe: 10x17x4 cm (HxBxT), Gewicht: 500 Gramm, invocem

Bestell-Nr. 3663 **€ 29,90**

Mundwinkel rauf – lassen Sie sich nicht unterkriegen!

Alle Fünfe mal gerade sein lassen, gelassen über Dinge hinwegsehen. Es ist nur ein einfacher Dreh. Und häufig sieht die Welt schon wieder anders aus ...

MENDOCINO-MOTOR, FERTIGMODELL

Im Magnetfeld frei schwebender Solarmotor

Rotor aus Acrylglas, Bodenplatte aus Echtglas, Maße: 20 x 10 x 10 cm, Carl Aero

Bestell-Nr. 3652 **€ 159,–**

Dieser Solar-Elektromotor ist eine Konstruktion, die schon auf den ersten Blick Aufmerksamkeit erregt. Oft wird erstaunt gefragt, wie sich ein solcher frei schwebender Körper überhaupt in Bewegung versetzt.

Der Motor verfügt über eine Lagerung aus sechs Hochleistungs-Neodym-Magneten. Dadurch scheint der Anker des Motors frei im Raum zu schweben. Der Anker selbst ist mit hocheffizienten monokristallinen Solarzellen bestückt. Diese liefern nur dann Strom, wenn sie sich im Lauf der Drehbewegung jeweils auf der Oberseite befinden. Die Kommutation dieses Motors findet auf optischem Weg statt.

Ein Video zum *Mendocino-Motor* finden Sie hier:
www.science-shop.de/artikel/1156118

Ebenfalls lieferbar als Bausatz (Löten erforderlich):
Bestell-Nr. 3653 **€ 139,–**

DIE KNOTENBOX

50 Knoten-Klassiker für Freizeit, Sport und Alltag

Mit 2 Schnüren zum Üben in Metallbox, moses

Bestell-Nr. 3617 **€ 12,95**

Der Seemann kann in jeder Lebenslage den richtigen Knoten knüpfen. Aber mit der Knotenbox lernen auch wir Landratten 50 bewährte Knoten mit Hilfe von 50 handlichen Karten und 2 Schnüren. Mit anschaulichen Schritt-für-Schritt-Abbildungen und wissenswerten Sachinformationen rund um Entstehung, Gebrauch und Anwendung der Knoten.

Besuchen Sie uns im Internet unter:
www.science-shop.de

Bequem bestellen:
- **→ direkt bei** www.science-shop.de
- **→ per E-Mail** info@science-shop.de
- **→ telefonisch** +49 6221 9126-841
- **→ per Fax** +49 711 7252-366
- **→ per Post** Postfach 810680 • 70523 Stuttgart

Für Bestellungen außerhalb Deutschlands und Österreichs berechnen wir € 3,50 Versandkosten. Alle Preise inkl. Umsatzsteuer. Preise unter Vorbehalt. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH

NEU

CAZORLA 8 x 56 PREMIUM

Fernglas mit Tragetasche aus Nylon

Achtfache Vergrößerung, Öffnung: 56 mm, hohe Vergütung, Gewicht: 1150 g, Pentaflex

Bestell-Nr. 3665 € 189,–

Ein hochwertiges Allround-Fernglas für alle Naturfreunde: Für die Astronomie bis zur Tier- und Landschaftsbeobachtung geeignet. Dank rutschfester Gummiarmierung liegt es gut in der Hand und ist hervorragend gegen Feuchtigkeit geschützt.

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich

CHARLES DESIGN-NUSSKNACKER

Polykarbonat/Aluminium, mit außergewöhnlicher Mechanik zum Nüsseknacken, schwarz

Design: Ralf Webermann, 62 x 70 mm, Gewicht: 145 Gramm, Troika

Bestell-Nr. 2842 € 32,90

Lieben Sie Nüsse? Wenn Sie bisher dachten, Nüsse zu knacken wäre eine lästige Angelegenheit, belehrt Sie CHARLES eines Besseren. Ein verblüffendes und sauberes Prinzip: Die Nüsse werden mittels Schleuderkraft im Deckel geknackt. Die Nussschalen werden sauber aufgefangen – keine Krümel mehr auf dem Tisch!

PEN ULTIMATE

Bestell-Nr. 1667

€ 13,90

Der schwebende Pen Ultimate ist ein Blickfang für Ihren Schreibtisch. Der Kugelschreiber schwebt in einer speziellen Halterung und kann um die Längsachse in Rotation gebracht werden.

Klaus Hünig

DIE UMKEHRBRILLE

Bausatz für eine Prismenbrille mit Totalreflexion

2011, lichtdichtes, belüftetes Gehäuse, Prismenhalter aus stabilem MDF, 2 hochwertige Dove-Prismen aus leichtem PMMA, 25 x 20 mm große Sichtfenster, Prismen-Visier hochklappbar, Anleitung, Sunwatch

Bestell-Nr. 3429 € 39,90

Mit einer Umkehrbrille können Sie viele Versuche selbst nacherleben. Wie lange dauert es, bis ich wieder Wasser in ein Glas gießen oder jemandem sicher die Hand reichen kann? Oder einen Text lesen? Oder etwas schreiben?! In der Umkehrbrille kommen hochwertige Dove-Prismen aus Acrylglas zum Einsatz, in denen die Bildumkehr durch Totalreflexion bewirkt wird. Es müssen nur die Prismen in ihre Halterungen geklebt und diese in das Brillengestell eingesetzt werden.

NEU

SPIELE-SET LATEIN

In Vino Veritas – das lat. Weisheitenspiel / Simplicissimus – das lat. Schimpfwortspiel

2012, je 40 Spielkarten, Anaconda

Bestell-Nr. 3715 € 15,90

Zwei Lege- und Merkspiele, die Ihre Lateinkenntnisse auf vergnügliche Art und Weise auffrischen!

Die Karten liegen verdeckt auf dem Tisch. Die Aufgabe ist es, möglichst viele Wortpaare zu sammeln.

Für 2–6 Spieler ab 8 Jahren. Dauer: 10–15 Minuten.

NEU

HERR GAUSS UND DIE ZUFRIEDENHEIT

Sandsteinobjekt

Rahmen von Hand gegossen, Bild von Hand gemalt, jedes Bild ist ein Unikat. Acryl auf Leinwand. Größe: 13 x 18,5 x 4 cm, (H x B x T), Gewicht: 1400 g, invocem

Bestell-Nr. 3661 € 49,90

Das Bild versteht sich als Appell, nicht immer nur verzweifelt dem Glück hinterherzujagen. Auf witzige Art wird dieser Gedanke durch die Überlagerung des Spektrums von Glück bis Unglück (rot bis dunkelgrau) durch die gauss'sche Normalverteilung versinnbildlicht. Sie zeigt die normalverteilte Anzahl an Stimmungen im Leben eines jeden.

RETRORADIO DELUXE

UKW-Röhrenradio zum Selberbauen

2011, Komplettbausatz mit Schleifenantenne. Benötigt werden: Vier 1,5-V-Mignon-Batterien (Typ AA), Lötkolben und Lötzinn für den Aufbau, Franzis

Bestell-Nr. 3456 € 79,95

Radio hören macht Spaß, ein Radio selbst bauen umso mehr. Dieser Komplettbausatz macht es Ihnen leicht: Ohne viel Mühe zaubern Sie daraus ein voll funktions-fähiges UKW-Röhrenradio im Retro-Stil. Der hochwertige Lautsprecher und das edle Holzgehäuse lassen dabei den typischen, warmen Klang eines Röhrengeräts voll zur Geltung kommen. Ein Genuss – akustisch wie optisch!

STREICHHOLZ-RÄTSEL (SPIEL)

50 Knobeleien für lichte Momente und zündende Ideen

2011, in Spielebox. Ab 12 Jahren, Moses

Bestell-Nr. 3398 € 9,95

Wie schafft man es, dass das Zündholz-Huhn von links nach rechts schaut? Und wie berichtigt man mathematische Gleichungen, wenn man dabei nur ein Streichholz umlegen darf? 50 knifflige Rätsel fördern Ihr Denkvermögen, Ihre Vorstellungskraft und Ihre Kombinationsfähigkeit. Sicher tappen Sie nicht lange im Dunkeln – bald wird Ihnen ein Licht aufgehen!

NEU

VIDEO-HELICOPTER SAFARI RTF/ GSY/3+3CH/MHZ

Mit abnehmbarer Kamera für Foto- und Videoaufnahmen und LED-Beleuchtung

L x B x H: 365 x 85 x 175 mm, Ø Hauptrotor: max. 360 mm / 70 mm, Fluggewicht: 270 g, Laden über beiliegendes Ladegerät, Controller mit 6 x 1,5-V-AA-Batterien (nicht enthalten), Revell

Bestell-Nr. 3717 € 99,–

Ready-to-Fly-MHz-Helikopter in auffälligem Design mit abnehmbarer Kamera für Foto- und Videoaufnahmen und über die Fernsteuerung schaltbarer LED-Beleuchtung. Der Helikopter hat sehr gute Flugeigenschaften durch das elektronische Kreiselsystem (Gyro) und ist leicht und gut beherrschbar. Das Laden erfolgt über das mitgelieferte Ladegerät.

Indoorgeeignet – outdoor nur bei Windstille. Altersempfehlung: ab 15 Jahren, Einsteigermodell

ALBERT-EINSTEIN-BÜSTE

aus Biskuitporzellan

Höhe: 14,5 cm, in weißer Geschenkschachtel; Kämmer

Bestell-Nr. 3651 € 24,90

Ein Schmuckstück für Regal oder Schreibtisch!

Die 14,5 cm hohe Büste wird gegossen, bei 1350 Grad gebrannt und anschließend poliert. Durch das Polieren des Biskuitporzellans erhält die Büstenoberfläche einen feinen, seidenmatten Glanz. Made in Germany!

DAS BAUMEISTERSPIEL KLASSIK

Unendliche Vielfalt

Format 12,5 x 12,5 cm, blaue Steine mit grauer Platte aus Recyclingkunststoff, Logika Spiele

Bestell-Nr. 3616 € 16,–

Acht verschieden gestaltete Bausteine, die jeder für sich aus mehreren Einzelwürfeln bestehen, werden auf einer Grundplatte zu den unterschiedlichsten Formen zusammengebaut. Mit seiner unerschöpflichen Vielfalt weckt es den Spielspaß und schult so spielerisch Gedächtnis, Konzentration, Geduld, Intelligenz und erst recht räumliches Vorstellungsvermögen, Fantasie, Intuition, laterales Denken. Für 1 Spieler.

ZAHLEN AM LAUFENDEN METER

Albrecht Beutelspachers Mathezollstock

2012, Maße: 24 x 1,6 x 2,8 cm, Metermorphosen

Bestell-Nr. 3650 € 12,90

Der Mathe-Meterstab zeigt Wissenswertes und Überraschendes aus der Welt der Zahlen und Formeln am laufenden Meter: von Pythagoras über Archimedes und Gauß bis zu dem indischen Zahlengenie Ramanujan.

Für Bestellungen außerhalb Deutschlands und Österreichs berechnen wir € 3,50 Versandkosten. Alle Preise inkl. Umsatzsteuer. Preise unter Vorbehalt. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH

Schrödingers Katze auf dem Prüfstand

Was passiert mit den manchmal geheimnisvollen Phänomenen der Quantenphysik, wenn man immer größere und schwerere Objekte betrachtet? Darüber stritten schon Erwin Schrödinger und Albert Einstein. Neue Experimente mit Systemen großer Masse sollen jetzt Hinweise zur Klärung dieses fundamentalen Rätsels liefern.

Von Markus Aspelmeyer und Markus Arndt

»Lieber Schrödinger, Du bist faktisch der einzige Mensch mit dem ich mich wirklich gern auseinandersetze …« So schreibt Albert Einstein im April 1935 aus Kalifornien an seinen Freund Erwin Schrödinger nach Oxford, wo der Wiener Theoretiker damals am Magdalen College arbeitete. Mit diesem Brief beginnt zwischen den beiden großen Geistern eine Grundsatzdiskussion über die Interpretation der Quantenphysik, die bis heute unter Forschern andauert: Was sagt die quantenmechanische Wellenfunktion über die physikalische Welt aus?

Der österreichische Physiker Erwin Schrödinger (1887–1961) hatte die Wellenfunktion 1926 als eine zentrale mathematische Größe der Quantentheorie eingeführt. Zusammen mit der so genannten Schrödinger-Gleichung lassen sich daraus Wahrscheinlichkeiten für die Ergebnisse zukünftiger Messungen an einem physikalischen System berechnen (siehe Kasten S. 46). Aber heißt das gleichzeitig, dass die Wellenfunktion deshalb etwas in der Welt real Existierendes beschreibt? Oder ist sie schlicht ein mathematisches Hilfsmittel ohne Bezug zur Realität, ein »Katalog von Erwartungswerten« (Schrödinger) zur Berechnung des möglichen Ausgangs zukünftiger Messungen? Die Diskussion darüber hat den österreichischen Physiker zur Formulierung seines berühmten Gedankenexperiments von »Schrödingers Katze« geführt (siehe Kasten S. 46). Letztlich geht es um die Frage, ob die Gesetze der Quantenphysik auch noch für Objekte gelten, die – wie etwa eine Katze – im Bereich unserer makroskopischen Erfahrung liegen, den die klassische Physik beschreibt.

Ein einfaches Quantenexperiment zeigt die Problematik auf: Ein Strahl von Molekülen, jedes einzelne aus mehreren Dutzend oder auch 100 Atomen zusammengesetzt, trifft auf ein Gitter mit 50 Nanometer breiten Spalten, die mit einem Abstand von 100 Nanometern in eine dünne Membran geschrieben sind. Dahinter befindet sich ein Detektorschirm. Wird nun der Ursprungsort der Teilchen in der Quelle sehr präzise festgelegt, so bleibt ihr seitlicher Impuls und damit ihre Quergeschwindigkeit in gewissen Grenzen unbestimmt oder »unscharf« – und zwar auf Grund der heisenbergschen Unschärferelation. Ihr zufolge lassen sich Ort und Geschwindigkeit eines Objekts nicht gleichzeitig beliebig genau bestimmen. Genauer: Das Produkt aus Ort und Geschwindigkeit kann einen gewissen Minimalwert nicht unterschreiten, der durch eine Fundamentalkonstante (das plancksche Wirkungsquantum) gegeben ist.

Für jedes der Moleküle gibt es dann bei seinem Flug von der Quelle zum Detektor durch die verschiedenen Spalten des Gitters mehrere gleichwertige Wege. Das Teilchen gelangt somit in eine quantenmechanische Überlagerung (Superposition) von fundamental ununterscheidbaren Möglichkeiten – die Basis für echte Quanteneffekte, hier insbesondere der Materiewelleninterferenz. Verhielten sich alle Moleküle wie Billardkugeln, die den Gesetzen von Newtons klassischer Mechanik folgen, so würde man – bei guter Bündelung des Molekularstrahls – auf dem Schirm für die Teilchenverteilung einen Schlagschatten des Gitters erwarten

AUF EINEN BLICK

TOT UND LEBENDIG?

1 Ein scheinbar paradoxes Gedankenexperiment von Erwin Schrödinger beschäftigt Quantenphysiker und Philosophen seit Jahrzehnten. Es geht um die fundamentale Frage, ob auch **ein makroskopisches Objekt in unbeobachtetem Zustand** mehrere sich eigentlich ausschließende Eigenschaften annehmen kann – ob etwa eine Katze zugleich lebendig und tot zu sein.

2 Dahinter steht das **Problem des Messprozesses** in der Quantenphysik: Bei der Beobachtung reduziert sich der vorher mehrdeutige Zustand verschiedener Möglichkeiten auf genau eine Wirklichkeit.

3 Seit einigen Jahren verbuchen Physiker große Fortschritte bei quantenphysikalischen Experimenten mit makroskopischen Objekten. Die Antworten beeinflussen unser grundlegendes Verständnis von **Wirklichkeit und Kausalität**.

(durchgezogener Strahl im Kasten S. 49, Bild a). Das Experiment liefert jedoch ein völlig anderes Ergebnis:

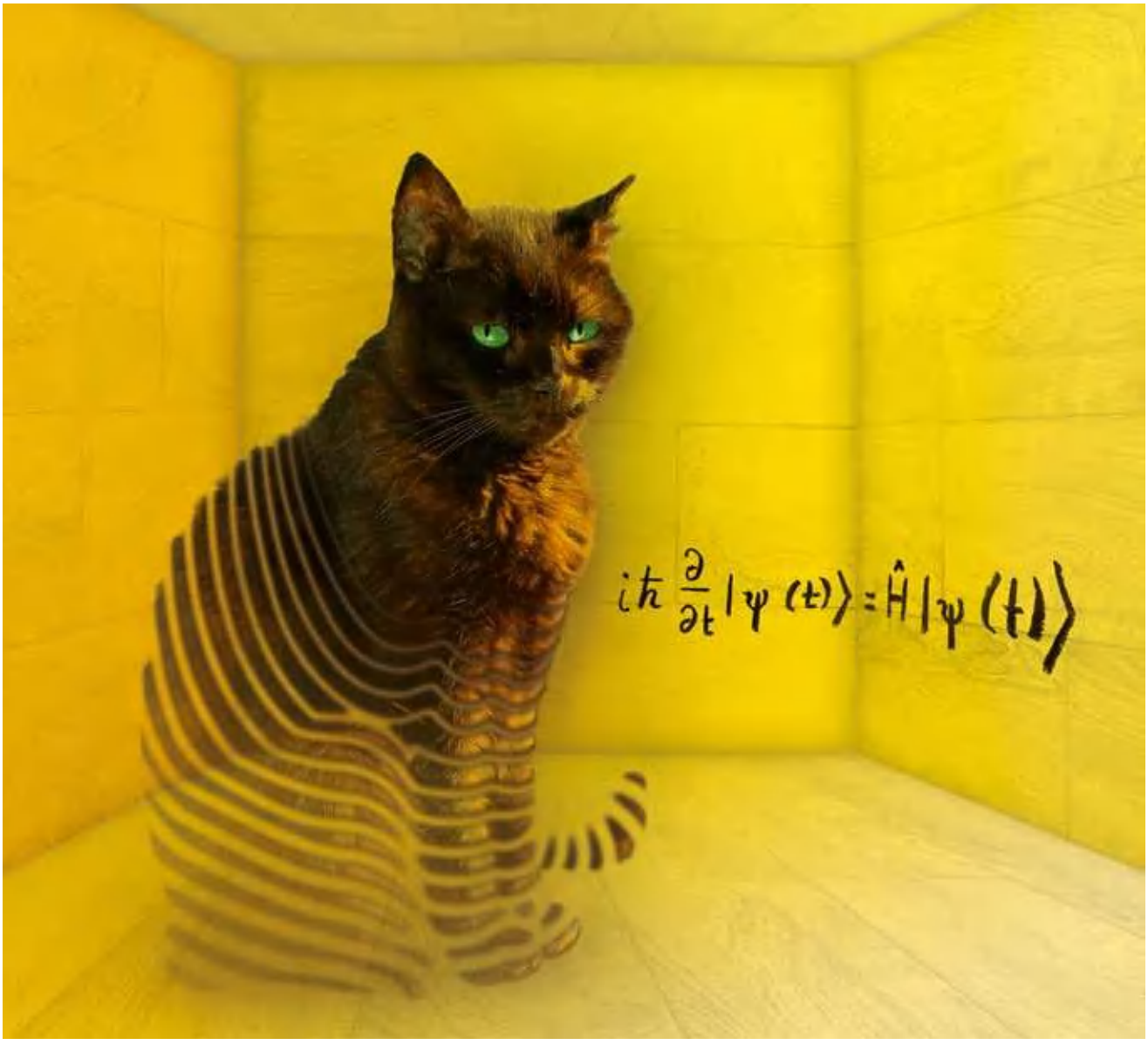
➤ Die einhüllende Schattenlinie ist viel zu breit, um von klassischen Objekten zu stammen.

➤ Es bilden sich Interferenzstreifen, sobald das Gitter mehr als einen Spalt aufweist.

Tatsächlich ist die übergroße Breite der »Schattenlinien« abermals eine Folge der Unschärferelation: Jeder der nur 50 Nanometer breiten Gitterspalte schränkt wiederum lokal die Wahl der möglichen Durchtrittsorte ein und sorgt so für eine quantenmechanische Unbestimmtheit und Aufweitung des Impulses quer zur Flugrichtung der Teilchen. Sähe jedes Molekül nur einen Spalt, so würde man einen verbreiterten Molekularstrahl auf dem Detektorschirm erwarten, etwa der schwarzen Linien im Kasten S. 49, Bild b folgend. Stellt man den Molekülen jedoch viele Spalten, also ein ganzes Gitter entgegen, bietet sich ein anderes Bild. Orte auf dem Schirm, die von den Molekülen bei der Beleuchtung durch nur einen Spalt durchaus erreicht werden könnten, bleiben dann dunkel – Interferenzstreifen entstehen (rote Kurve in Kasten S. 49, Bild a). Damit realisiert die Quantenphysik das sprichwörtliche »Weniger ist mehr« auf eine ungewöhnliche Art.

Die Quanteninterferenz komplexer Moleküle am Gitter demonstrierten Markus Arndt und seine Kollegen an der Universität Wien in den Laboren von Anton Zeilinger vor 13 Jahren zum ersten Mal. Mit einer rund 1000-mal empfindlicheren Detektoranordnung schritten kürzlich Thomas Juffmann und seine Kollegen in der Gruppe von Markus Arndt auf diesem Weg weiter voran: Die Forscher filmten den Wellen-Teilchen-Dualismus direkt mit einer CCD-Kamera, indem

Schrödingers Katze hat ein langes Leben: Aktuell untersuchen Forscher, ob auch Makroteilchen Quantenobjekte sind.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / DANIELA LEITNER

sie verfolgten, wie quantenmechanische Interferenzmuster sich aus einzelnen Farbstoffteilchen in Echtzeit aufbauen. Der Film macht beide Aspekte der Welt sichtbar: einerseits die *Teilchennatur* jedes einzeln fluoreszierenden Moleküls, womit man meint, dass jedes Molekül sehr präzise – hier auf bis zu zehn Nanometer genau – auf dem Detektorschirm lokalisierbar ist; andererseits seine quantenmechanische Wellennatur, die benötigt wird, um zu erklären, wie sich alle weit voneinander entfernten Teilchen wie von Geisterhand gelenkt zu einem Streifenmuster arrangieren (siehe Kasten S. 49; siehe www.spektrum.de/Quantenfilm).

Juffmann und Kollegen benötigten für ihre Experimente besonders dünne Nanostrukturen, die nur noch 100 Atomlagen dick waren. Das minimiert die sonst störenden Kräfte (die so genannten Van-der-Waals-Kräfte) zwischen vorbeifliegenden Teilchen und den Gitterwänden. Zwei israelischen Forschern von der Tel Aviv University, Aleksander Tsukernik und Ori Cheshnovsky, gelang es, solche Gitter herzustellen, womit das Wiener Team die Quantennatur noch größerer Moleküle untersuchen konnten, die aus mehr als 100 Atomen bestehen und von den Chemikern Jens Tüxen und Marcel Mayor von der Universität Basel speziell für diesen Zweck chemisch synthetisiert wurden.

Das Ergebnis des Experiments widerlegte die klassische Annahme, dass ein Molekül nur auf genau einem Weg durch die verschiedenen Spalte des Gitters treten kann – sozusagen: entweder rechts oder links um eine Strebe herum. Die Quantentheorie sagt dagegen die gemessenen Interferenzen richtig voraus. Ihr zufolge wird Materie durch eine Wellenfunktion beschrieben, die sich gleichberechtigt entlang aller möglichen Wege ausbreiten kann. Außerdem kann sie auch makroskopisch ausgedehnt (»delokalisiert«) sein; in dem Laborversuch am Ende der Flugstrecke über einige zehntel Millimeter hinweg. Die heute bekannten Gesetze der Quantenphysik gelten im Prinzip für beliebig große Objekte. Entsprechend lassen sich solche Überlagerungen auch auf ma-

Schrödingers Katze, seine Gleichung und die Wellenfunktion

Im Jahr 1935 schlug Erwin Schrödinger ein scheinbar paradoxes Gedankenexperiment vor: Man nehme eine Katze und sperre sie in eine Kiste. Außerdem stelle man noch ein Giftfläschchen dazu sowie ein radioaktives Element, das zu einem nicht vorhersehbaren Zeitpunkt zerfallen wird. Sobald das geschieht, setzt ein Mechanismus Giftgas frei und tötet augenblicklich das Tier.

Das klingt grausam, verdeutlicht aber nur ein fundamentales Dilemma der Quantentheorie, mit dem der österreichische Theoretiker ihre Unvollständigkeit demonstrieren wollte. Das Problem: Der radioaktive Atomkern ist nach den Gesetzen der Quantentheorie zunächst in einem Überlagerungszustand aus »zerfallen *und* nicht zerfallen«. Würden diese Gesetze nun auch für makroskopische Objekte wie eine Katze gelten, müsste sich auch diese in einem Überlagerungszustand, nämlich »lebend *und* tot«, befinden. In dieser Phase sind für Atom und Katze lediglich Wahrscheinlichkeitsaussagen möglich.

Erst beim Öffnen der Kiste (dem Moment der Beobachtung oder Messung) ändert sich die Lage dramatisch. Dann springt das Atom in einen der beiden Zustände »zerfallen« oder »nicht zerfallen« – und die Katze entsprechend in »tot« oder »lebendig«. So erklärt es jedenfalls die Kopenhagener Interpretation dieser bizarren Quantenphänomene, der die meisten Physiker anhängen.

Als Ursache wird in dem Kopenhagener Bild ein »Kollaps der Wellenfunktion« postuliert, also eine Reduzierung von einem überlagerten Mischzustand zu einem eindeutigen Zustand. Alternativ besagt die Dekohärenztheorie, dass dieser Kollaps nicht eigens gefordert werden muss. Stattdessen würde bereits die Wechselwirkung des Systems mit der Umgebung einen der zulässigen Zustände herbeiführen, was dann einem »effektiven« Kollaps der Wellenfunktion entspräche.

Die Wellenfunktion (fachlich oft mit dem griechischen Buchstaben Ψ, Groß-Psi, bezeichnet), ebenfalls Schrödingers Schöpfung, beschreibt den Überlagerungszustand der Objekte gemäß einer mathematischen Gleichung, die der Theoretiker 1926 aufstellte:

$$i\hbar\,\partial/\partial t\,\Psi(x,t) = \hat{H}\,\Psi(x,t).$$

Dabei ist i die imaginäre Zahl $\sqrt{-1}$, die so genannte reduzierte Planck-Konstante $\hbar$ entspricht $1{,}05 \cdot 10^{-34}$ Joulesekunden (die so genannte reduzierte Planck-Konstante), das Zeichen $\partial/\partial t$ steht für die partielle Ableitung nach der Zeit, und $\hat{H}$ steht für den so genannten Hamilton-Operator, in dem die Bewegung der Objekte sowie äußere Kräfte enthalten sind. Das Wichtigste in diesem Naturgesetz, die veränderliche Funktion Ψ, hängt selbst von Ort und Zeit ab. Sie steht für den Systemzustand – jetzt und in Zukunft.

Auch wenn das reichlich abstrakt klingt – im Prinzip beschreibt die Gleichung eindeutig, wie sich die Wellenfunktion aus einem gegenwärtigen Zustand in die Zukunft hineinentwickelt. Und der $\hat{H}$-Operator repräsentiert die Energie des Systems.

Das revolutionäre Konzept der Quantenphysik besagt nun, dass die Wellenfunktion selbst nicht messbar ist. Lediglich ihr Betragsquadrat, $|\psi|^2$, nimmt eine Bedeutung in der Realität an, nämlich als Wahrscheinlichkeitsverteilung. Dieses Betragsquadrat von Ψ gibt also an, mit welcher Wahrscheinlichkeit sich ein bestimmtes Objekt in einem bestimmten Zustand zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort befindet.

Diese Interpretation hat tiefe Auswirkungen auf die Frage der Kausalität der Welt: Einzelmessungen sind nicht mehr deterministisch vorbestimmt, sondern nur noch statistisch festgelegt, während das Ensemble exakt vorhersagbar bleibt.

Reinhard Breuer

kroskopische Zustände übertragen – mit dramatischen Konsequenzen für unser Weltbild. Genau darum geht es im berühmten Beispiel von Schrödingers Katze. Schrödinger konstruierte im Gedankenexperiment eine »Höllenmaschine«, mit der sich der Überlagerungszustand eines einzelnen Teilchens auf die Zustände »tot« und »lebendig« einer Katze übertragen lässt. Das bedeutet in Analogie zum Vorherigen: Es lässt sich prinzipiell ein Experiment durchführen, dessen Ergebnis im Widerspruch zu der Annahme steht, dass die Katze zu jedem Zeitpunkt definitiv entweder tot oder lebendig war.

Für Einstein war das ein klarer Beleg, dass die Quantenmechanik die Realität nicht korrekt erfasst, wie er in seinem Brief von 1935 auf den Punkt brachte: »Durch keine Interpretationskunst kann diese Psi-Funktion [Wellenfunktion; *Anmerkung der Verfasser*] zu einer adäquaten Beschreibung eines wirklichen Sachverhaltes gemacht werden.« Auch unsere eigene makroskopische Erfahrung sagt uns, dass es »in Wirklichkeit« weder ein Zwischending zwischen tot und lebendig gibt noch, wie im genannten Beispiel, die gleichzeitige Anwesenheit an zwei völlig unterschiedlichen Orten.

Wo liegt die Grenze zur klassischen Physik?

Heißt das, dass sich Objekte »auf Makroebene« eben doch nicht nach den kontraintuitiven Gesetzen der Quantenphysik, sondern gemäß der klassischen Mechanik Isaac Newtons und der Elektrodynamik James Maxwells verhalten? Wenn dem so wäre: Wo läge die Grenze? Bei welcher Masse, Größe, Quantenzahl oder strukturellen Komplexität würden die Theorien einander ablösen oder ineinander übergehen? Wie würde das aussehen? Könnte vielleicht sogar die Gravitation dabei eine Rolle spielen, an deren Vereinheitlichung mit der Quantenphysik sich die Theoretiker schon seit Generationen die Zähne ausbeißen (siehe SdW 4/2012, S. 34)?

Diese Art der Lösung des Katzenparadoxons würde zur Folge haben, dass die Quantentheorie für die Makroebene zumindest erweitert werden müsste. Ein ungewöhnlicher Schritt, den viele Physiker mit Skepsis betrachten. Denn die Quantenmechanik – und präziser noch ihre relativistische Form, die Quantenelektrodynamik – hat sich über 100 Jahre hinweg in allen Experimenten bravurös behauptet.

Andererseits: Bleibt die Quantenphysik auch makroskopisch gültig, müssen wir unser Weltbild in mehreren Punkten radikal ändern, so etwa unser Verständnis von Raum und Zeit sowie den Wirklichkeitsbegriff von Zuständen makroskopischer Objekte. Darüber wären nun wiederum andere Physiker nicht glücklich.

Es läuft auf die fundamentale Frage hinaus: Gibt es jenseits einer bestimmten Schwelle die Quantensuperposition »objektiv« nicht mehr, oder ist die Welt fundamental »quantisch«? Könnte es also sein, dass wir die Quantenphänomene bei großen Objekten nur nicht sehen können, weil sie im Labor nicht messbar sind, wenn mehr als 100 oder auch 100 Billionen Teilchen zusammenwirken? Diese Fragen sind derzeit – immer noch – völlig offen. Niemand hat darauf eine

Antwort, die nicht neue Probleme aufwerfen würde. Physiker nähern sich diesem Thema aber durch reale Quantenexperimente mit immer größeren und schwereren Objekten. Masse und Ort spielen dabei eine besondere Rolle.

Eine offensichtliche Erklärung für die Schwierigkeit, Quantenphänomene zu beobachten, besteht darin, dass ihre Beschreibung fast immer explizit das (reduzierte, also durch 2π geteilte) plancksche Wirkungsquantum $\hbar$ enthält. Die so genannte Wirkung hat die physikalische Einheit eines Drehimpulses, aber auch des Produkt aus »Energie mal Zeit« oder »Impuls mal Weglänge«. Mit $\hbar = 1{,}05 \cdot 10^{-34}$ Joulesekunden ist das Wirkungsquantum um 33 Größenordnungen kleiner als beispielsweise der Drehimpuls des Pendels einer alten Standuhr. Bei einem Unterschied um so viele Zehnerpotenzen ist es eigentlich nicht verwunderlich, dass man die Quantisierung des Standuhrpendels nicht beobachtet. Auch Interferenzphänomene sind kaum makroskopisch zu erwarten. Eine 170 Gramm schwere Billardkugel mit einer Stoßgeschwindigkeit von zirka zwei Metern pro Sekunde wäre im ruhenden Bezugssystem des Pooltisches durch eine Quantenwelle von $2 \cdot 10^{-33}$ Meter Länge beschrieben. Eine so winzige Strecke überfordert völlig die Messgenauigkeit sämtlicher heutiger Laborgeräte. Damit passt die Größe des Wirkungsquantums also recht gut zur physikalischen Alltagserfahrung.

Hinzu kommt: Selbst wenn man der Quantenphysik eine universelle Gültigkeit zugesteht, so kann gerade die Wechselwirkung zwischen einzelnen Teilen eines komplexeren Quantensystems dafür sorgen, dass bei keinem seiner Teilkomponenten Quanteneigenschaften sichtbar werden. Das ist die Einsicht der Dekohärenztheorie, die schon früh von den Quantenphysikern Anthony Leggett (University of Illinois), Hans-Dieter Zeh und Erich Joos (Universität Heidelberg) und Wojciech Zurek (Los Alamos National Laboratory) entwickelt wurde. Ihre Kernaussage lautet: Koppelt ein einfaches Quantensystem an ein großes externes Gebilde mit vielen anderen Teilchen (dem »Wärmebad«) an, so gibt es Information über seinen Zustand an das Bad ab. Das zuvor isolierte Quantenobjekt ist nun mit Elementen aus dem Bad »verschränkt« – sie bilden jetzt ein größeres Quantensystem.

Der Begriff der quantenmechanischen Verschränkung wurde erstmals 1935 von Erwin Schrödinger formuliert und bezeichnet die Quantensuperposition von gemeinsamen Eigenschaften mehrerer physikalischer (Teil-)Systeme. Bei ihnen lässt die Wellenfunktion des Gesamtsystems keine vollständige separate Beschreibung der Teile mehr zu. Dieses Phänomen war für Schrödinger »das charakteristische Merkmal der Quantenphysik«. Es bedeutet aber, dass man bei isolierter Betrachtung des eigentlich mit seiner Umgebung korrelierten Teilsystems schwächere und unter Umständen keine Quanteneffekte mehr sehen kann, etwa keine Interferenzen. Bei der Verschränkung des Quantensystems mit der Umgebung gehen die am Teilsystem beobachtbaren Quanteneigenschaften verloren.

Quantitative Untersuchungen zur Dekohärenz gelangen 1996 dem französischen Team um Serge Haroche in den Laboren der École normale supérieure in Paris. Mit Hilfe von Rubidiumatomen und einem Hohlraum mit spiegelnden Innenwänden kreierten sie eine experimentelle Version von Schrödingers Katze »aus Licht« und konnten unter kontrollierten Bedingungen ihren Zerfall studieren. Die kontrollierte Dekohärenz von materiellen Objekten durch Streuung von Licht wurde auch schon früh in der Atominterferometrie in Laboren des Massachusetts Institute of Technology in Cambridge (USA) sowie der Universität Konstanz nachgewiesen. Physiker der Universität Wien konnten 2004 zeigen, dass große Moleküle sich sogar von sich aus, rein thermisch, mit der Umgebung verschränken, ohne dass es eine äußere Störung geben muss. Die perfekte Isolation von der Umwelt ist somit eine der größten Herausforderungen bei makroskopischen Quantenexperimenten.

Das Schöne an der Dekohärenz: Sie kann vollständig innerhalb der etablierten Quantenphysik verstanden werden und erklärt zudem, warum sich reine Quantenphänomene nur eingeschränkt beobachten lassen. Damit bildet sie ein Schlüsselproblem in vielen jungen Technologien, vom Quantencomputer bis hin zu Quantensensoren. Es bleibt aber eine fundamentale Herausforderung für den Wirklichkeitsbegriff. Dekohärenz macht die Welt nämlich nicht »real« im engeren Sinn. Sie erklärt uns nicht den »Kollaps der Wellenfunktion«, warum also bei einer konkreten Messung genau ein bestimmtes Einzelereignis aus einer großen Zahl möglicher Resultate realisiert wird.

Im Gegenteil: Da das Modell auf quantenmechanischer Verschränkung basiert, bleibt in jedem Experiment alles in einem Überlagerungszustand. Es gibt keinen endgültigen Messprozess, die Quantenüberlagerungen von Möglichkeiten werden nie in ein Einzelergebnis aufgelöst, sondern durch Wechselwirkungen nur in immer komplexere Superpositionen überführt. Das Dilemma mit dem »Kollaps« führt manche Physiker zur Vielwelten-Theorie. Während seiner Dissertation an der Princeton University schlug Hugh Everett III 1954 eine Interpretation der Quantenphysik vor, die das Messproblem auflösen soll. Demnach bliebe die Theorie universell gültig, zugleich würde aber die klassisch verbotene Überlagerung makroskopisch unterscheidbarer Zustände dadurch vermieden, dass bei einer Messung nicht im »Kollaps« ein bestimmter Endzustand auf unklare Weise ausgewählt wird. Everetts kühne Idee: Bei jeder Messung würden alle möglichen Zustände eines Systems in verschiedenen Welten tatsächlich realisiert. Diese Hypothese ist zwar in sich logisch konsistent, hat aber den offensichtlichen Nachteil, wahrlich verschwenderisch mit der Zahl der Universen umzuspringen. Sie ist zudem prinzipiell nicht falsifizierbar und daher für die wissenschaftliche Diskussion nur von eingeschränktem Wert.

Wirkt Gravitation auf die Unschärferelation?

Physiker, die sich mit fortwährenden Überlagerungszuständen nicht recht abfinden können, fragen sich, ob man nicht stattdessen die Grundgleichungen der Quantenphysik selbst modifizieren müsste, damit sich auf der Ebene von Makroobjekten wieder klassisches Verhalten zeigt. Diese Änderungen sollten klein genug sein, dass man sie in keinem der bisherigen Experimente entdecken konnte, andererseits groß genug, um auf makroskopischer Skala ausschließlich die Gesetze der klassischen Physik gelten zu lassen.

Die ersten Ideen, durch nichtlineare Erweiterungen der Quantentheorie einen »klassischen Unterbau« zu verordnen, gehen bereits auf Louis de Broglie (1892–1987) zurück, dem Vater der Idee einer mit der Materie verknüpften Wellenfunktion. Die Hoffnung des französischen Theoretikers war, die gängige lineare Quantentheorie als Grenzfall einer nichtlinearen Wellenmechanik herleiten zu können, die auf klassischen Konzepten beruht. »Linear« bedeutet dabei, dass jede Überlagerung von zwei oder mehr Wellenfunktionen der Theorie wieder eine gültige Wellenfunktion derselben Gleichungen ist.

1976 formulierten die polnischen Physiker Iwo Bialynicki-Birula und Jerzy Mycielski eine nichtlineare Erweiterung der Schrödinger-Gleichung, in der sich die Wellenfunktionen von Objekten mit größerer Masse zeitlich nicht verändern und sich somit wie kleine Billardkugeln verhalten. Für weniger massereiche Objekte würden weiterhin die Regeln der herkömmlichen Quantentheorie gelten, und die Wellenfunktion könnte sich wieder im Raum ausbreiten (»delokalisieren«). Doch diese nichtlineare Erweiterung der Theorie konnten Roland Gähler, Anthony G. Klein und Anton Zeilinger bereits 1981 durch ein hochpräzises Beugungsexperiment mit Neutronen experimentell ausschließen, da die spezielle Form der Nichtlinearität die höheren Beugungsordnungen der Materiewelle direkt beeinflussen müsste – was sich aber nicht nachweisen ließ.

Eine andere mögliche Erweiterung der Quantentheorie schlug ein italienisches Forscherteam um Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini und Tullio Weber 1986 vor. Ihre Idee lautete, der Schrödinger-Gleichung einen winzigen nichtlinearen stochastischen Term hinzuzufügen. Dieses mathematische Zusatzelement sorgt automatisch dafür, dass Überlagerungszustände von Positionen mit der Zeit auf loka-

lisierte Zustände im Raum reduziert werden. Das klingt kompliziert, bewirkt aber, dass die Wellenfunktion bei ihrer Entwicklung »objektiv kollabiert«, also von einem ausgedehnten delokalisierten Zustand auf eine kleine (aber nicht punktförmige) räumliche Domäne zusammenschnurrt.

Der Kollaps verläuft nach diesen Berechnungen jedoch so blitzartig, dass selbst die präzisesten Experimente der letzten Jahrzehnte ihn weder gefunden haben – noch hätten finden können. Im Licht neuer theoretischer Ansätze gehen die Vorhersagen mit diesem Modell inzwischen so weit, dass man seine Gültigkeit testen könnte, wenn es experimentell gelänge, die Quantensuperposition von Objekten im Bereich zwischen 10^5 und 10^9 Protonenmassen zu beobachten.

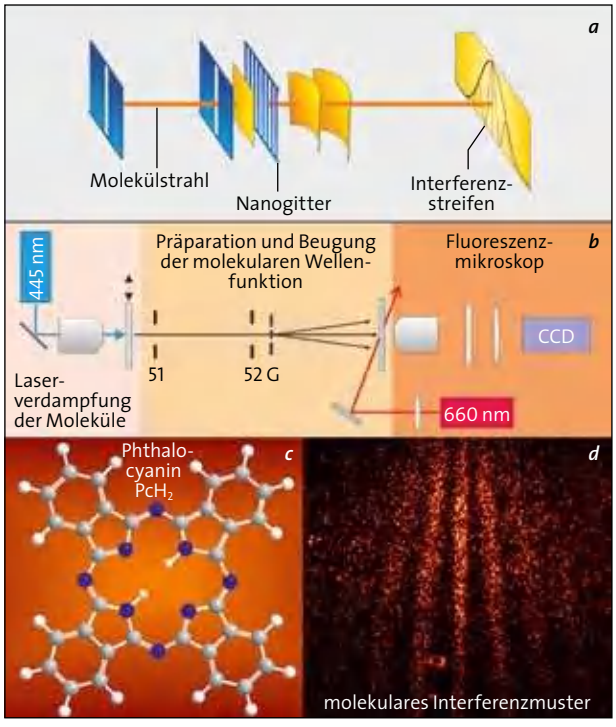
Eine weitere Klasse von Kollapstheorien nimmt explizit Bezug auf die mögliche Rolle der Gravitation. Wie wirkt sich die heisenbergsche Unschärfe eines massereichen Teilchens auf die Raumzeit aus? Was passiert mit dem Gravitationsfeld eines schweren Teilchens, wenn es sich in einer Superposition aus verschiedenen Orten befindet und schwer genug ist, dass sein Gravitationsfeld auf sich selbst rückwirken kann?

Fragen dieser Art haben unabhängig voneinander etwa die ungarischen Physiker Frigyes Károlyházy und Lajos Diósi sowie der englische Physiker Sir Roger Penrose bearbeitet. Ähnlich wie bei den oben beschriebenen Modellen kommt es auch hier zu einer verstärkten Dekohärenz von Quantenüberlagerungen, deren Stärke mit Masse und Größe der untersuchten Teilchen und ihrer Wellenfunktionen anwächst. Solche Abwandlungen der Quantentheorie entsprechen jedoch keinesfalls bereits einer neuen Theorie der Quantengravitation, die immer noch den heiligen Gral der Physik darstellt. Im Gegenteil: Hauptursache für das Verschwinden der Quantensuperposition in diesen Modellen ist gerade die Annahme, dass das Gravitationsfeld nicht quantisiert vorliegt. Aus Experimenten, die solche erweiterten Theorien testen, hoffen Forscher gleichzeitig indirekt etwas über die Möglichkeit einer Quantengravitation zu lernen.

Lange Zeit waren die Kollapsmodelle eher Teil philosophischer Diskussionen um die Bedeutung von Messprozess und Wellenfunktion. Doch mittlerweile erwarten viele Physiker, dass man mögliche Effekte solcher Kollapsmodelle auch im Labor testen kann. Welche Experimente stellen also die Quantenphysik auf den Prüfstand der makroskopischen Welt? Wo könnte man erwarten, dass die Vorhersagen der gängigen Theorie widerlegt werden? Alle diskutierten Kollapsmodelle haben eines gemeinsam: Je besser sich die Zustände einer Quantenüberlagerung unterscheiden lassen, desto schneller verschwinden die Quanteneffekte. Allerdings nehmen auch die Dekohärenzeffekte der althergebrachten

Quanteninterferenzen am Gitter

Das Gitterbeugungsexperiment mit Licht ist ein Standardversuch des fortgeschrittenen Physikunterrichts. Es demonstriert den Unterschied zwischen Strahlenoptik und Wellenoptik für elektromagnetische Wellen. Die gleiche Idee lässt sich auch auf Materiewellen übertragen.



MARKUS ASPELMEYER UND MARKUS ARNDT

Die Beugung massereicher Moleküle an einem Nanogitter (*a*) ist ein Paradebeispiel für die nichtlokale Natur der Quantenphysik. Die Farbstoffmoleküle (Phthalocyanine) werden mit Hilfe eines fokussierten Laserstrahls von einem Glas abgedampft (*b*). Die effektive Quellgröße (Laserfokus plus Kollimationsspalt) ist so klein, dass die Orts-Impuls-Unschärfe jedes Molekül in einen Zustand zwingt, der zunächst über mehrere der nur 100 Nanometer voneinander getrennten Spalte delokalisiert ist. Damit gibt es mehrere prinzipiell ununterscheidbare Wege für jedes Molekül von der Quelle zum Ziel. Auf dem Detektionsschirm werden die Teilchen mittels laserinduzierter Fluoreszenzmikroskopie einzeln und mit einer Ortsauflösung von etwa zehn Nanometern abgebildet.

Der Auftreffpunkt jedes Einzelmoleküls ist prinzipiell nicht vorhersagbar, und die entsprechende Wellenfunktion ist bis zum Detektor über mehr als 100 Mikrometer delokalisiert. Das Ensemble aller Moleküle arrangiert sich aber dennoch zu regulären Interferenzstreifen, die quantenmechanisch streng vorherbestimmt sind.

Die Wellenfunktion der PcH_2-Moleküle aus Bild *c* durchdringt im Versuchsaufbau von Bild *b* ein Nanogitter an mehreren Orten zugleich und erzeugt so ein streng vorherbestimmtes Interferenzmuster (*d*), das aber aus zufälligen Einzelereignissen aufgebaut wird.

Quantentheorie zu – »Große Katzen dekohärieren schneller«. Es wird daher in Zukunft wichtig sein, diese Effekte in Experimenten voneinander zu unterscheiden. Dabei helfen zwei wesentliche Eigenschaften:

➤ Die erweiterten Kollapstheorien treffen ihre Vorhersage – im Gegensatz zur Dekohärenztheorie – selbst für komplett isolierte Objekte.

➤ Es werden Experimente gesucht, in denen konventionelle Dekohärenz und ein möglicher »Kollaps« unterschiedlich mit Laborparametern skalieren, etwa mit dem Volumen.

Die Grundidee dabei lautet wie folgt: Erzeuge eine Quantensuperposition aus zwei oder mehreren, möglichst makroskopisch separierten Ortszuständen eines massereichen Objekts; dann versuche, Quanteninterferenzeffekte zu sehen. Sollte sich die Welt auf der Makroebene fundamental anders verhalten als auf der Mikroebene, würde man erwarten, an eine Grenze zu stoßen, oberhalb derer sich keine Interferenzeffekte mehr erzeugen lassen, unabhängig von der Isolation.

Geht man allerdings ins Detail der vielen Modelle, die den Kollaps der Wellenfunktion beim Messprozess beschreiben, wird schnell klar, dass die Anforderungen an mögliche Experimente gewaltig sind. Zum Beispiel erwartet man erste mögliche Effekte durch die von Ghirardi und Kollegen vorgeschlagenen »spontanen« Kollapsmodelle in einem Massebereich ab etwa 10^5 bis 10^8 atomaren Masseneinheiten (amu) und einer Separation der möglichen Ortszustände von rund 100 Nanometern. Die bislang noch unbestätigten Einflüsse der Gravitation auf den Kollaps vermuten Experten bei den aktuellen Modellen mit mehr als 10^9 und 10^{16} Protonenmassen. Wir wollen zwei Vorhaben skizzieren, die in diese Region vordringen können:

➤ Quanteninterferenzen mit noch komplexeren Molekülen, Clustern und Nanokristallen;

➤ Quantenexperimente mit massereichen mechanischen Objekten.

Wir haben eingangs das einfachste aller Interferenzexperimente beschrieben, nämlich die Beugung von Materiewellen an einem Gitter. Tatsächlich haben Forscher bei größeren Massen viele Varianten der Quanteninterferenz untersucht. Insbesondere hat sich eine Idee des Physikers John Clauser, damals noch an der University of California in Berkeley, als fruchtbar für die Arbeit mit makroskopischen Materiewellen herausgestellt: Alle Interferometer benötigen eine anfänglich feste Phasenbeziehung zwischen den Teilwellen, die am Schluss überlagert werden sollen. Eine solche ist bei typischen Quellen für Cluster und Moleküle jedoch nicht automatisch gegeben. Erst eine raffinierte Anordnung von drei hintereinandergeschalteten nanostrukturierten Gittern ermöglicht das Kunststück. Zuerst werden Teilchen, die aus thermischen oder sonstigen ungeordneten Quellen ausgestoßen werden, durch ein Gitter vorstrukturiert und delokalisiert. Danach werden diese Objekte am zweiten Gitter gebeugt, was sich mit einem dritten Gitter nachweisen lässt.

In der Gruppe um Markus Arndt an der Universität Wien wurde von Stefan Gerlich, Lucia Hackermüller und Kollegen nach diesem Prinzip das so genannte Kapitza-Dirac-Talbot-Lau-Interferometer (KDTL) entwickelt (siehe Spektrum der Wissenschaft 1/2012, S. 40). Mit Teilchen der Baseler Chemiker Jens Tüxen und Marcel Mayor sowie des Chemikers Paul Fagan (Dupont, US-Bundesstaat Delaware) gelang es den Wiener Experimentatoren erstmals, eine kontrastreiche Quanteninterferenz mit Molekülen von mehr als 400 Atomen und Massen um 7000 atomaren Einheiten zu erzielen.

Die Wellenfunktion dieser Objekte war bei dem Interferenzexperiment räumlich über das rund 100-Fache des Moleküldurchmessers ausgedehnt (»delokalisiert«), was dem 100 000-Fachen ihrer De-Broglie-Wellenlänge entsprach. Wesentlich kamen in diesem Versuch Gitter aus Licht zum Einsatz. Diese beeinflussen die Moleküle durch die Wechselwirkung zwischen dem elektrischen Feld des Lichts und der Polarisierbarkeit der Moleküle. Lichtgitter werden insbesondere in den Experimenten der nächsten Generation relevant, in denen auch die Präparation und Detektion des Molekularstrahls rein optisch erfolgen wird.

Materiewelleninterferometrie mit Lichtgittern hat viele mögliche Anwendungen. Zunächst geht es darum, die Mas-

Weitere Experimente zur Makro-Quantenphysik

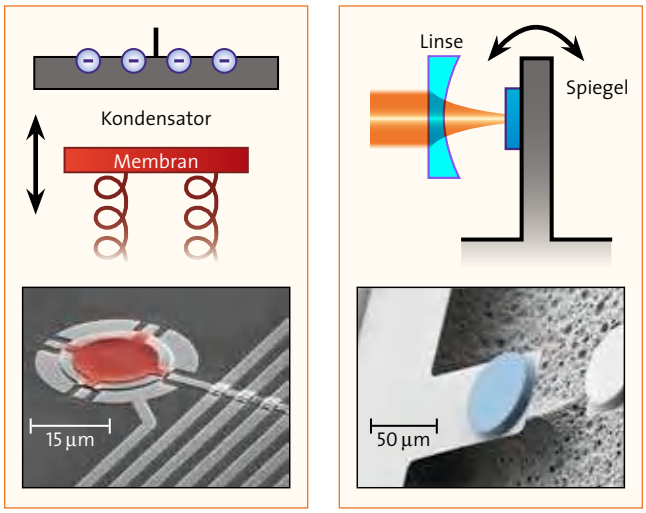
In einer Reihe weiterer Experimente spielen ebenfalls makroskopische Überlagerungszustände eine zentrale Rolle:

➤ Die Überlagerung von supraleitenden Strömen, die in einem Schaltkreis sowohl im als auch gegen den Uhrzeigersinn umlaufen können (SQUID = superconducting quantum interference device).

➤ Die Überlagerung von Billionen von gemeinsamen Spins zwischen zwei Atomwolken, wie sie Eugene Polzik und seine Mitarbeiter in Kopenhagen erzeugten.

➤ Die Materiewelleninterferenz von Millionen von Atomen, die gemeinsam als ultrakaltes Gas in einem Bose-Einstein-Kondensat (BEC) präpariert wurden. Dabei können die Atome bei Temperaturen von wenigen Nanokelvin über Millimeterdistanzen und hunderte Millisekunden delokalisiert sein. Solange die Atome nicht miteinander verschränkt sind, bleibt die interferierende Masse und die De-Broglie-Wellenlänge in diesen Experimenten jeweils die jedes einzelnen Atoms – so wie auch ein Laser seine Farbe behält, wenn man seine Intensität erhöht. Mehrere Gruppen arbeiten daran, ultrakalte Atome miteinander zu verschränken, um die Messgenauigkeit zu erhöhen.

Auch quantenphysikalisch verschränkte Zustände von Ionen und Atomen können sich heutzutage über Distanzen von mehreren Metern und im Fall von Photonen sogar von bis zu 140 Kilometern ausbreiten.



MARKUS ASPELMEYER UND MARKUS ARNDT

Membranen (links) und Spiegel: Mit solchen Objekten testen Physiker, ob die Quantenphysik auch für die Makrowelt gültig ist. Die Membranbewegung moduliert die Länge eines Kondensators. Genauso verändert der schwingende Spiegel (rechts) die Länge eines optischen Resonators. In beiden Fällen variiert dadurch die Zahl der Photonen, die auf die Objekte treffen: Ihr Strahlungsdruck koppelt die Mechanik an die Photonen.

sengrenze der zu beugenden Objekte in Laborexperimenten noch um weitere zwei Größenordnungen, also auf eine Million amu, auszudehnen. Für Massen zwischen 10^6 und 10^9 amu werden derzeit vor allem Experimente in der Schwerelosigkeit diskutiert, die natürlich eine sehr lange Vorlaufzeit haben. Aber unabhängig davon, wie die Messungen der nächsten Jahre ausgehen werden – ob sie die Quantenphysik perfekt bestätigen oder von ihr abweichen –, die Resultate werden in jedem Fall erlauben, neue Grenzwerte für die mögliche Gültigkeit alternativer Theorien zur etablierten Quantenphysik zu definieren. Darüber lässt sich die Interferometrie mit Materiewellen auch in Quantensensoren einsetzen, etwa zur Vermessung äußerer Kräfte oder innerer Teilcheneigenschaften. Das führt in der physikalischen Chemie zu interessanten Anwendungen, etwa zur präzisen Charakterisierung optischer, elektrischer und magnetischer Eigenschaften von komplexen Molekülen und Clustern.

In den letzten fünf Jahren gab es außerdem rasante und unerwartete Entwicklungen an der Grenze zwischen Quantenphysik und Mikromechanik. Mehrere Forschungsgruppen arbeiten derzeit intensiv daran, mechanisch schwingende Nano- und Mikroresonatoren mit gut kontrollierten Quantensystemen zu verbinden. Das Ziel dabei ist, die Quantenkontrolle über einen mechanischen Freiheitsgrad zu gewinnen, zum Beispiel den Schwingungszustand einer winzigen Biegefeder, eines einseitig eingespannten Stabs, ähnlich einem Sprungbrett. Das erschließt spannende neue Anwendungen, darunter für

- mechanische Sensoren, die dank Quanteneigenschaften mit bislang unerreichter Auflösung Abstände, Kräfte, Massen und Energie messen könnten, und
- mechanische Transportmechanismen für Quantencomputer, um einzelne Quanten-Bits auf einem Chip miteinander zu verknüpfen.

Dadurch öffnet sich ein völlig neues Fenster für makroskopische Quantenexperimente. Die Objekte in diesen Experimenten bestehen aus vielen Atomen, die sich als ein Objekt kollektiv im Raum bewegen – etwa bei einer Stabschwingung. Mechanische Quantenkontrolle bedeutet daher die Möglichkeit, die gesuchten Überlagerungszustände eines massereichen, makroskopischen Objekts herzustellen.

Forscher verfolgen weltweit Ansätze mit verschiedenen mechanischen Gebilden, die einen Massenbereich von mehr als 20 Größenordnungen überdecken: von Atomwolken mit 10^5 Atomen über nano- und mikromechanische Objekte mit bis zu 10^{15} Atomen bis hin zu kilogrammschweren mechanischen Objekten mit mehr als 10^{25} Atomen, etwa als Spiegel in Gravitationswellendetektoren.

Quantenobjekte können an zwei Orten zugleich sein

Die Grundidee ist eigentlich simpel: Die Forscher versuchen, die bereits kontrollierbaren Quanteneigenschaften eines mikroskopischen Systems auf das makroskopische mechanische System zu übertragen, also zum Beispiel den Überlagerungszustand eines elektronischen Qubits auf den räumlichen Überlagerungszustand eines mechanischen Objekts. Ein Qubit ist allgemein ein Quantensystem mit zwei überlagerten Zuständen, das quantenmechanische Äquivalent eines Bits. Erst durch Messung werden die beiden Zustände voneinander unterscheidbar. Als kleinstmögliche Speichereinheit dient ein Qubit auch als Maß für die Quanteninformation in Quantencomputern. Eine Wechselwirkung zwischen Qubit und mechanischem Objekt kann also eine Überlagerung von zwei möglichen Orten des Objekts erzeugen.

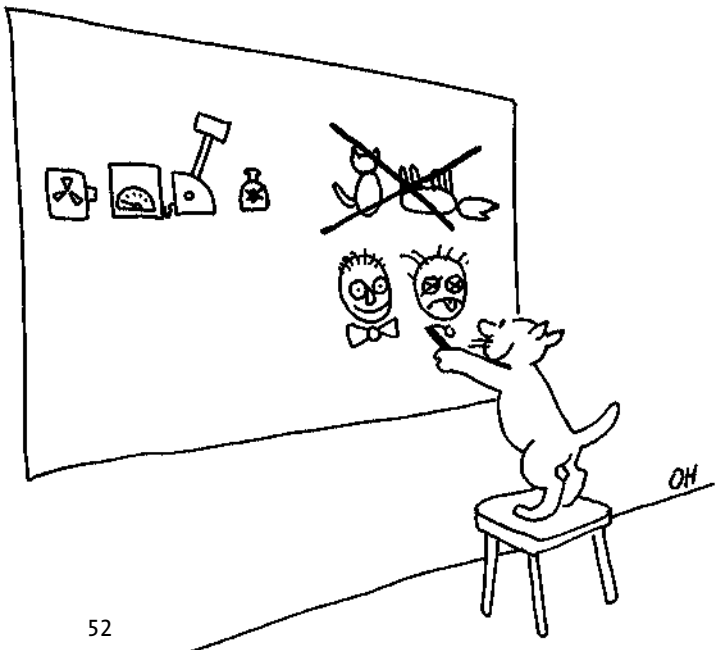
Das ist 2010 erstmals Forschern um Aaron O'Connell in den Labors von Andrew Cleland und John Martinis an der University of California in Santa Barbara gelungen. Die Physiker konnten bei einem mikromechanischen Objekt mit 10^{13} Atomen die Quanteninterferenz von zwei räumlich getrennten Zuständen beobachten. Ein erster viel versprechender Schritt! Trotz der vergleichsweise großen Masse von einem Nanogramm konnte dieses Experiment allerdings keine der angesprochenen Kollapsmodelle testen. Die beiden räumlich getrennten Zustände hatten lediglich einen Abstand von einem millionstel Atomdurchmesser – noch viel zu klein, um Effekte jenseits der gängigen Quantentheorie unterscheiden zu können. Ein anderer Typ von Experimenten beleuchtet quantenmechanische Objekte mit Lichtteilchen. Die Forscher nutzen dabei die Kraftübertragung der Photonen, wenn sie von einem Objekt reflektiert werden: den Lichtdruck. Damit lassen sich die mechanischen Eigenschaften vollständig mit Laserlicht oder Mikrowellen steuern. Mit den Methoden der Quantenoptik lassen sich so Quantenzustände der mechanischen Bewegung erreichen.

Das erfordert, thermische Anregungen der Objekte so stark zu unterdrücken, dass die Bewegung durch die Quantenphysik beschrieben wird. Eine effiziente Methode dafür ist die Laserkühlung. Diese war auch die Grundlage von zwei neuen Experimenten vom Jahr 2011. Dabei bombardierten die Physiker ein mechanisches Objekt nur mit Photonen. Deren Lichtdruck reichte, um es in den Quantengrundzustand der Schwingung zu versetzen. In diesem Zustand ist die Bewegungsenergie vor allem durch die Unschärfe des quantenmechanischen Wellenpakets gegeben. Ein Lichtresonator sorgte dabei dafür, dass je nach Bewegungsrichtung des Objekts wenige oder viele Photonen auf das Objekt trafen. Nahezu jedes einzelne Photon konnte es daher ein wenig abbremsen (»kühlen«), bis nur noch Quantenfluktuationen die Bewegung dominierten. Ähnlich könnte man auch ein Auto abbremsen, indem man es mit Tennisbällen bewirft.

Nanokugeln, eingefangen in einem Käfig aus Licht

Im Experiment bestrahlten Forscher um John Teufel am National Institute of Standards sowie an der University of Colorado eine schwingende Membran von 15 Mikrometer Durchmesser und 100 Nanometer Dicke mit Mikrowellen. In dem zweiten Laborversuch verwendeten Jasper Chan sowie die Kollegen um Oskar Painter (California Institute of Technology) und Markus Aspelmeyer (Universität Wien) Laserlicht, um einen Lichtwellenleiter bis auf seinen quantenmechanischen Grundzustand abzukühlen.

Der in diesen Versuchen erreichte Zustand ist der Ausgangspunkt für weitere Quantenexperimente, insbesondere für die Erzeugung von Überlagerungszuständen verschiedener Orte des massereichen mechanischen Objekts. Analog zu den Experimenten der Amerikaner um O'Connell, Cleland und Martinis könnte man sich beispielsweise vorstellen, die Überlagerungszustände mittels Photonen durch Lichtdruck auf die Mechanik zu übertragen – auf Grund der geringen Kraftübertragung von Photonen wird die räumliche Trennung der Zustände allerdings ähnlich winzig sein.



Die Herausforderung für solche Makroexperimente liegt darin, komplementär zu den Laborversuchen mit Materiewellen die räumliche Dimension der Überlagerung zu vergrößern. Es gilt, Konzepte der Mikroquantenmechanik mit denen der Materiewelleninterferometrie zu verknüpfen, wie kürzlich von Forschern um Oriol Romero-Isart in der Gruppe von Ignacio Cirac am Max-Planck-Institut für Quantenoptik vorgeschlagen. Die Idee ist, eine Nanokugel in einem Lichtkäfig einzufangen, darin räumlich zu fixieren und danach dieses Objekt durch quantenoptische Kontrolle in ihrem Quantengrundzustand der Bewegung zu präparieren. Ist die Nanokugel fixiert, kann sie als Teilchenquelle für Interferometer dienen. Dann wäre man am Ziel. Man würde massereiche Objekte mit 10^{10} Atomen oder noch mehr benutzen und mit ihnen die Überlagerungszustände um mehr als den Durchmesser der Teilchen voneinander trennen.

Auf dem Weg zur makroskopischen Quantenphysik erwarten die Physiker enorme Herausforderungen:

- Die Dekohärenz, also die Unterdrückung von Interferenz durch Wechselwirkung mit der Umwelt, muss so klein wie möglich gehalten werden – nur so lassen sich die gesuchten Quantenphänomene sichtbar machen.
- Die Experimente funktionieren daher nur im bestmöglichen Ultrahochvakuum.
- Die innere Temperatur der Teilchen sowie die äußere Umgebung müssen deshalb idealerweise auf die Temperatur von flüssigem Helium abgekühlt werden.

Schon kurzwellige Photonen eines nicht tiefgekühlten Teilchens oder einer warmen Umgebung würden bereits genügend Information über den Ort des Teilchens transportieren. Auch muss sich die quantenmechanische Delokalisierung eines massereichen Objekts nach einem Doppelspalt – für Teilchen im Bereich von 10^{10}amu – einige hundert Sekunden lang ungestört entwickeln können, um messbar zu werden.

Bei so schweren Gebilden kommt nun überraschenderweise die Gravitation ins Spiel, und zwar durch die Erde. Ihre Schwerkraft würde über einen Zeitraum von mehreren Minuten die untersuchten Objekte einfach aus der Apparatur »nach unten« herausziehen. Wie geht man als Experimentator damit um? Es gibt zwei Möglichkeiten, die Erdanziehung zu kompensieren: womöglich durch äußerst homogene elektromagnetische Felder. Sie könnten die Teilchen in der Apparatur schweben lassen, ohne die Entwicklung der Quantenzustände zu stören. Alternativen böten ein Satellit oder die Internationale Raumstation mit ihrer fast schwerelosen Umgebung. Für solche Quantenexperimente könnten diese tatsächlich interessante Forschungsplattformen bereitstellen. Die Europäische Weltraumbehörde ESA fördert bereits solche Ideen. Das Weltall bietet nicht nur Hochvakuum und weit gehend Schwerelosigkeit; es existieren auch viele optische Technologien in einer weltraumtauglichen Ausführung.

Eine weitere Perspektive bieten Experimente direkt im Grenzgebiet zwischen Quantenphysik und Gravitation. Erst

Sonntag, 20:15 Uhr

Tatortzeit – Cicero blickt hinter die Kulissen des erfolgreichsten TV-Krimis der Republik.
Plus: Von Furtwängler bis Liefers – alle 20 Ermittler-Teams als Cicero-Titel

JETZT PROBE LESEN!

Cicero bietet Hintergrundberichte, Reportagen und spannende Geschichten zu aktuellen Themen aus Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Kultur. **Hier gratis kennenlernen:**

Telefon: 0800 282 20 04
E-Mail: abo@cicero.de
Online: www.cicero.de/probe
Jetzt auch als App: www.cicero.de/digital

Cicero-Leserservice
20080 Hamburg
Bestellnr.: 875183

Cicero
Magazin für politische Kultur

W I S wissenschaft in die schulen!

Didaktische Materialien für den Unterricht zum Thema »Quanten« kostenfrei herunterladen unter:

www.wissenschaft-schulen.de/quanten

kürzlich hat dazu ein Forscherteam um Igor Pikovski bei Časlav Brukner an der Universität Wien und Myungshik Kim am Imperial College London einen Vorschlag veröffentlicht. Darin beschreiben die Physiker, wie es per Quantensteuerung massereicher mechanischer Objekte möglich sein sollte, im Labor Vorhersagen diverser Varianten der Quantengravitationstheorie zu testen.

Konkret geht es um die Frage, welche beobachtbaren Konsequenzen die mögliche Existenz einer minimalen Längenskala hat. Die meisten dieser Theorien gehen jedenfalls davon aus, dass es eine solche kleinste Länge gibt: die so genannte Planck-Länge (10^{-35} Meter). Wenn das zutrifft, würde der Raumbegriff spätestens unterhalb dieser Größenordnung seine Bedeutung verlieren. Dann müsste man aber eine kleine mathematische Korrektur an der Unschärferelation anbringen, wie sie Werner Heisenberg 1927 formuliert hatte. Wie erwähnt besagt dieses Naturgesetz, dass sich Ort und Geschwindigkeit (eigentlich: Impuls) eines Objekts nicht gleichzeitig beliebig genau beobachten lassen. Allerdings lässt diese Relation zu, dass etwa der Ort eines Objekts beliebig genau bestimmt sein kann, wenn nur im Gegenzug die Geschwindigkeit beliebig unbestimmt bleibt. Das würde jedoch der Annahme einer kleinsten (Planck-)Länge widersprechen. Wenn also tatsächlich eine kleinste Längenskala existiert, so muss das in der mathematischen Formel mit einer Korrektur explizit berücksichtigt werden.

Doch der erwartbare Effekt ist so klein, dass es für absehbare Zeit unmöglich sein wird, ihn durch direkte Beobachtung der Orts- und Geschwindigkeitsverteilung eines einzelnen Objekts zu messen. Die höchste Genauigkeit bei Ortsmessungen liegt derzeit bei etwa 10^{-19} Meter. Das liegt also noch 16 (!) Größenordnungen von der Planck-Länge entfernt. Der Vorschlag von Pikovski und Kollegen umgeht diese Begrenzung, indem er die optische Quantensteuerung mechanischer Objekte ausnutzt. Damit könnten Experimentatoren an massereichen mechanischen Objekten mit Hilfe von kurzen Laserpulsen sehr exakte Operationen ausführen, etwa eine Veränderung des Orts oder der Geschwindigkeit. Führt man nun mehrere Operationen dieser Art hintereinander aus, dann lässt sich das Objekt nach einigen Zwischenschritten wieder in seinen ursprünglichen Zustand überführen.

Klassisch könnte man den Anfangs- und Endzustand einer solchen Sequenz nicht unterscheiden. Quantenmechanisch ginge das aber. Denn die schrödingersche Wellenfunktion hat sich bei dem Durchlauf verändert. Sie hat eine zusätzliche Phase erhalten, die die Information über die Wegänderung des mechanischen Objekts enthält. Das Erstaunliche des neuen Vorschlags lässt sich fachlich so beschreiben: Die Phase der Mechanik wird auf das Lichtfeld aufgeprägt und auf Grund des Strahlungsdrucks nichtlinear verstärkt.

Werden nun die Lichtpulse optisch gemessen, dann lassen sich Änderungen im Wert der Phase registrieren – auch solche, die durch eine modifizierte heisenbergsche Unschärferelation verursacht werden sollten. Im Prinzip würde sich also so ein Laborexperiment dazu eignen, bestimmte Vorhersagen der Quantengravitation auf der sonst unerreichbaren Planck-Skala zu überprüfen.

Wenn also Makro- und Quantenwelt im Labor zusammentreffen – was werden wir aus diesen Experimenten lernen? Eines ist sicher: Vorläufig wird Raum für verschiedene Deutungen der Resultate bleiben. Sollten alle Experimente bei hoher Masse und Komplexität lediglich die Vorhersagen der etablierten Quantenphysik bestätigen, bliebe der philosophische Erkenntnisstand aus Sicht des Quantenphysikers unverändert. Gleichwohl würden dann etliche alternative Vorstellungen über die Welt ausgeschlossen werden – etwa jene, die den Kollapsmodellen zu Grunde liegen.

Nicht weniger spannend ist die andere Variante. Nehmen wir an, die Forscher würden im Labor auf reproduzierbare Abweichungen von den etablierten Vorhersagen der gängigen Quantentheorie stoßen. Dann wäre es eine Herausforderung, zu entscheiden, ob diese mit »neuer Physik« oder doch im Rahmen der gängigen Quantentheorie ablaufen.

DIE AUTOREN

Markus Aspelmeyer (links) ist Professor für Quantum Information on the Nanoscale an der Universität Wien. **Markus Arndt** ist Professor für Quantennanophysik an der Universität Wien. Beide sind Mitglied des Vienna Center for Quantum Science and Technology (VCQ).

QUELLEN

Chan, J. et al.: Laser Cooling of a Nanomechanical Oscillator into its Quantum Ground State. In: Nature 478, S. 89–92, 2011
Hornberger, K. et al.: Colloquium: Quantum Interference of Clusters and Molecules. In: Reviews of Modern Physics 84, S. 157–173, 2012
Juffmann, T. et al.: Real-Time Single-Molecule Imaging of Quantum Interference. In: Nature Nanotechnology 7, S. 297–300, 2012
Pikovski, I. et al.: Probing Planck-Scale Physics with Quantum Optics. In: Nature Physics 8, S. 393–397, 2012
Zeilinger, A.: Einsteins Schleier. Die neue Welt der Quantenphysik. C.H.Beck, München, 8. Auflage 2005

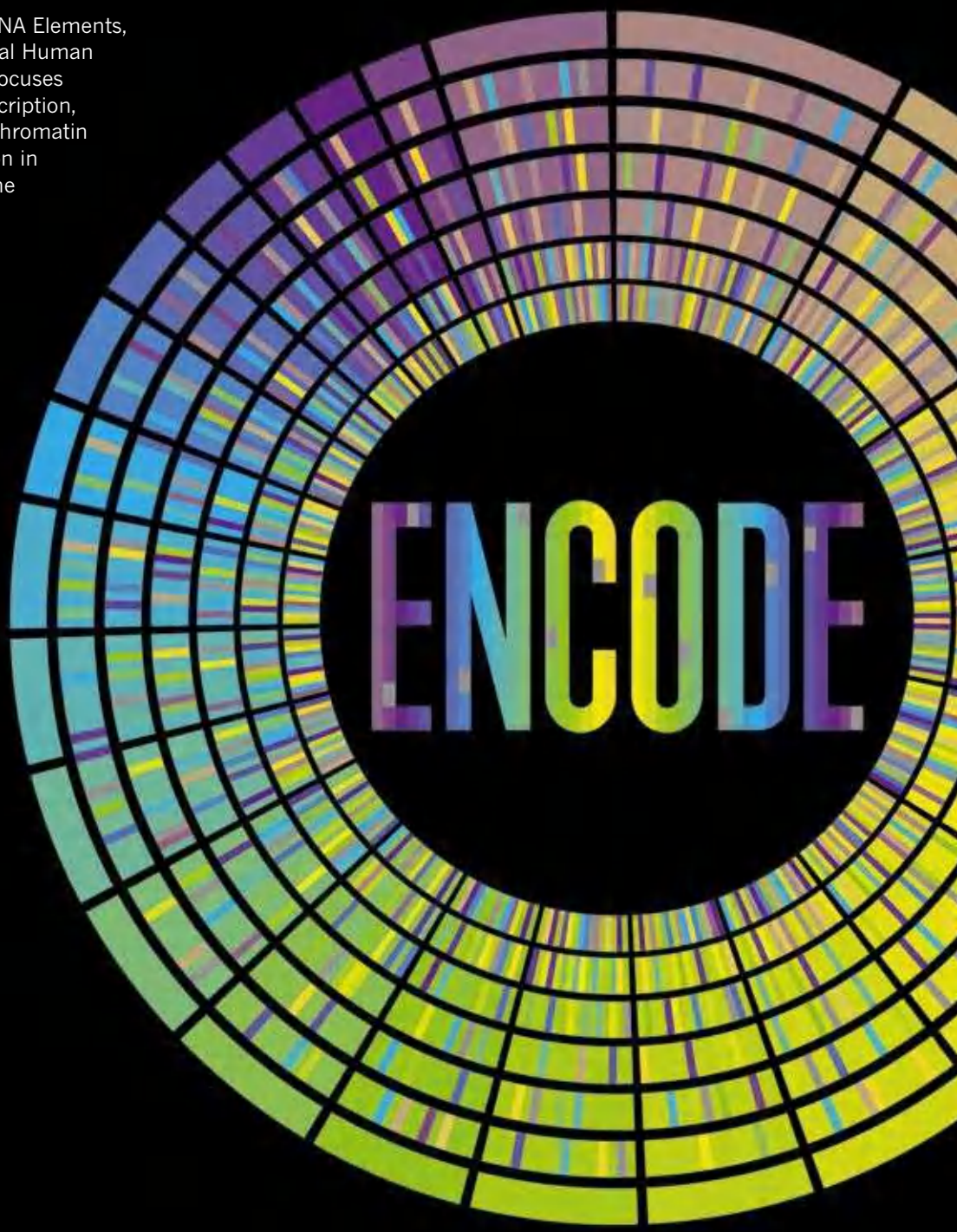
WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1159808**

nature | ENCODE

ENCODE, the Encyclopaedia of DNA Elements, is a project funded by the National Human Genome Research Institute and focuses on identifying all regions of transcription, transcription factor association, chromatin structure and histone modification in the human genome sequence. The main findings of ENCODE are now presented in 30 papers published simultaneously in *Nature*, *Genome Research* and *Genome Biology*.

Access videos, Features and the collected research papers, and explore the thematic threads that run through them via the *Nature* ENCODE explorer or the *Nature* ENCODE app.



Produced with support from

illumina®

Available on the App Store

nature.com/ENCODE

nature publishing group npg

Schielt der Mond?

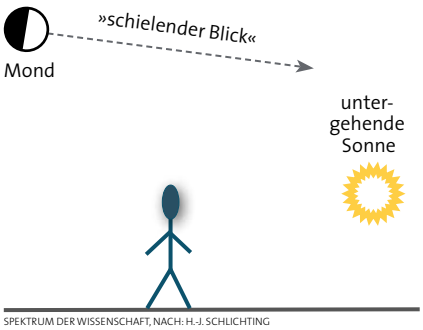
Die Mondsichel weist stets exakt zur Sonne – so muss es sein, weil sich Licht geradlinig ausbreitet. Doch manchmal schert sich die Natur nicht darum!

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

> … die Unregelmäßigkeit der Figur, die auf der einen Seite Relief gewinnt (wo die Strahlen der sinkenden Sonne sie besser erreichen) und auf der anderen in einer Art Zwielicht verharrt.
>
> *Italo Calvino (1923–1985)*

Nicht wenige Menschen glauben noch immer, die Mondphasen kämen durch Schatten zu Stande, welche die Erde auf den Mond wirft. Ihnen riet einst der Pädagoge und Physikdidaktiker Martin Wagenschein (1896–1988), »dass es nichts nützt, den Mond allein anzustarren«, man müsse ihn schon »mit der Sonne zusammen als Ganzes« ansehen. Ein guter Rat: Der Laie, der dies tut, wird dem Phänomen der Mondphasen früher oder später auf den Grund kommen. Allerdings bringt Wagenscheins Empfehlung ein anderes Problem mit sich.

Das erste kleine Experiment verläuft noch wie erwartet. Verbinden wir die Punkte des Monds, an denen die Schattenlinie beginnt und endet – bei der Mondsichel sind dies die Spitzen der beiden Hörner – mit einer gedachten Geraden. Dann müsste die auf dem Mittelpunkt der Geraden stehende Senkrechte direkt in die Sonne weisen. Anders gesagt: Die erleuchtete Seite des Monds ist auf die Sonne gerichtet, weil er von dieser angestrahlt wird. So sagt es der gesunde Menschenverstand, und so bestätigt es auch die Beobachtung.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: H.-J. SCHLICHTING

Kurz nach Neumond, wenn sich die Mondsichel nahe der untergehenden Sonne befindet und wir beide Himmelskörper mit einem einzigen Blick erfassen können, erweist sich der Zusammenhang zwischen der Richtung der Sonnenstrahlen und der Orientierung der Mondsichel als recht offensichtlich.

Was aber ist einige Tage später? Der Mond nimmt nun zur selben Tageszeit einen größeren Abstand zur Sonne ein, und wir gewinnen den deutlichen Eindruck, dass er »schielt«. Die von der beleuchteten Mondseite ausgehende »Sehlinie« verfehlt ihr Ziel, der Mond scheint geradewegs über die Sonne »hinwegzublicken« (siehe unten stehende Skizze). Demnach müsste das Licht der Sonne auf einem Bogen zum Mond gelangen!

Dieses Phänomen ist seit Langem bekannt. Bis heute wird darüber teilweise kontrovers diskutiert, ob in Fachzeitschriften, Internetforen oder Gesprächen unter Kollegen. Mathematiker, Physiker, Amateurastronomen, Informatiker und Psychologen haben sich von ihm reizen lassen und astronomische Gegebenheiten, komplexe Überlegungen zur projektiven und sphärischen Geometrie oder auch die Wahrnehmungspsychologie zur Lösung des Rätsels herangezogen. Nicht wenige der Erklärungen, die im Lauf der Zeit gegeben wurden, sind allerdings unvollständig oder gar falsch.

Diese Situation ist in der Realität unmöglich, trotzdem beobachten wir sie gelegentlich: Der Mond scheint nicht direkt zur Sonne zu »blicken«, sondern »schielt« über sie hinweg. Zu einer solchen Täuschung unserer Wahrnehmung kommt es aber nur, wenn wir Mond und Sonne nicht mit einem einzigen Blick erfassen können und stattdessen erst den einen Himmelskörper und, nach einer Drehung des Kopfs, den anderen ins Auge nehmen.

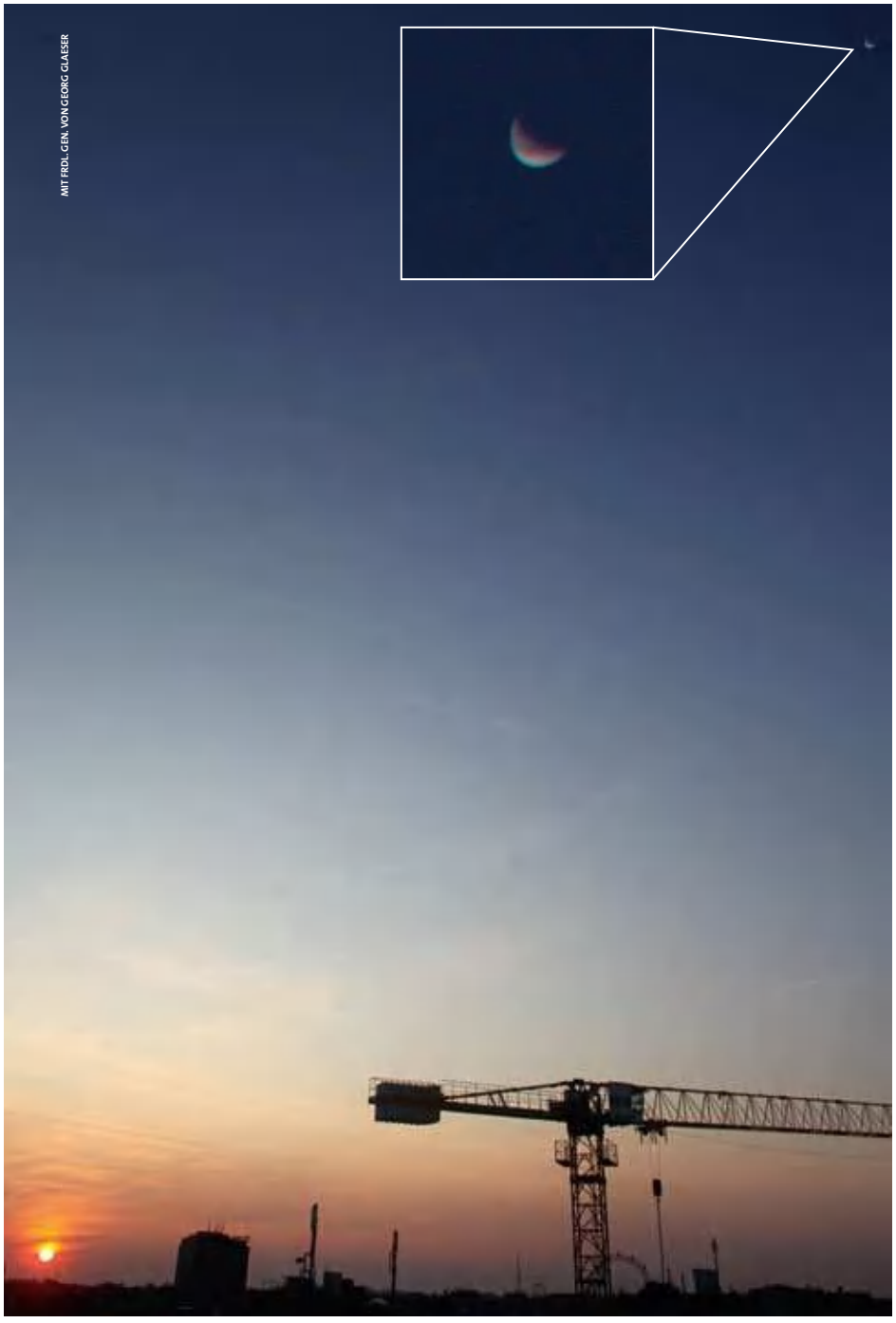
Trügerische Beobachtung an den Grenzen unserer Wahrnehmung

Dabei ist das Problem schon länger gelöst. Der belgische Astronom und Naturphänomenologe Marcel Minnaert (1893–1970) lieferte bereits um 1940 eine ebenso einfache wie plausible Erklärung. Minnaert verglich die vermeintliche Krümmung der Linie mit derjenigen des Lichtbündels eines Suchscheinwerfers. Steht man senkrecht zur Bahn des Scheinwerfers – und ist die Luft dunstig, so dass von dort genügend Licht in unsere Augen gestreut wird –, scheint das Lichtbündel sowohl in Richtung seiner Quelle als auch seines äußersten »Endes« zum Boden hin gekrümmt zu sein.

»Wie kommt es zu dieser optischen Täuschung?«, fragt Minnaert und gibt folgende Antwort: »Ich neige dazu, die Bahn gekrümmt zu sehen, weil ich sie auf der einen Seite nach links zum Horizont hin abfallen sehe, auf der anderen Seite nach rechts. … *Dabei habe ich aber nicht bedacht, dass ich mich ja zuerst nach links, dann nach rechts gewandt habe.* Bei einer einfachen horizontalen geradlinigen Telegrafenleitung sieht man übrigens genau dasselbe« (kursiv im Original).

Mit dieser Erklärung bringt der belgische Forscher die Grenzen unserer

Wahrnehmung ins Spiel. Denn sowenig wir die beiden Enden eines weit reichenden Lichtbündels oder einer Telegrafenleitung mit einem einzigen Blick erfassen können, sowenig gelingt uns das – zumindest nicht im Allgemeinen – mit Sonne und Mond. Wir sehen zunächst auf Letzteren und registrieren, wohin er blickt. Dann wenden wir den Kopf und schauen die Sonne an, die schon ziemlich dicht über dem Horizont steht. Anschließend vereinigt unser Wahrnehmungsapparat die beiden Bilder zu einem einzigen, die aber nicht zwangsläufig zusammenpassen. Beispielsweise können Blickwinkel, Helligkeit und Größe des Bildausschnitts der Einzelbilder voneinander abweichen, ohne dass uns dies beim Anblick des Gesamtbilds bewusst würde.



In unserem Fall ist es die Perspektive, die sich entscheidend auswirkt. Stellen wir uns vor eine gekachelte Wand und blicken senkrecht auf eine der waagerechten Linien, idealerweise in Augenhöhe (siehe Fotos auf der folgenden Seite). Sie scheint nicht von der Horizontalen abzuweichen. Anschließend schwenken wir den Kopf nach links oder rechts. Nun neigen sich, je weiter wir blicken, alle waagerechten Linien zur mittleren Linie hin.

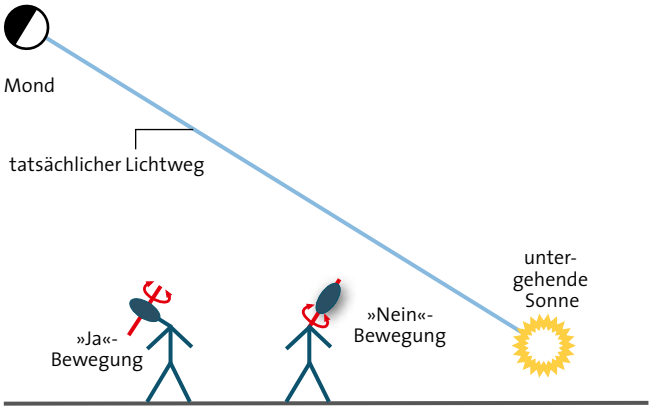
Auf Fotos springt uns diese Tatsache regelrecht ins Auge. Im normalen Leben merken wir davon aber meist nichts, weil uns Perspektiveneffekte vertraut sind: Wer glaubt schon, dass sich die Linien des regelmäßigen Kachelmusters einer Wand nach links und rechts zu neigen beginnen?

Bei der Ansicht des Monds haben wir mit perspektivischen Einflüssen hingegen keine Erfahrung. Wir gehen ihnen arglos auf den Leim, zumal auch Bezugspunkte wie die rechtwinkligen Linien an einem Haus fehlen.

Das Beweisfoto gelingt, wenn Sonne und Mond günstig stehen

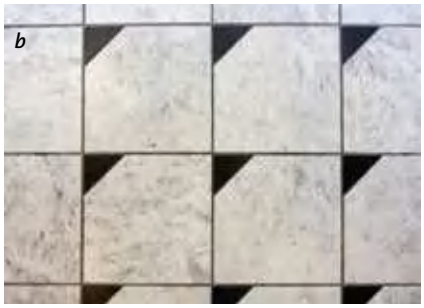
Letzten Endes benötigt man die Physik aber doch, neben geometrischen und wahrnehmungspsychologischen Überlegungen, um das Phänomen vollständig zu durchschauen. Bei günstigen Himmelskonstellationen können wir Sonne und Mond in einem einzigen Bild erfassen. Im Fall eines um 90 Grad gegen die Sonne verschobenen Halbmonds ist das mit einem entsprechenden Weitwinkelobjektiv gerade noch verzerrungsfrei möglich: Auf solchen Fotos blickt der Mond der Sonne brav

Sonne und Mond sind selten gleichzeitig am Himmel zu sehen. Diese Aufnahme gelang bei Sonnenuntergang mit einem 20-Millimeter-Weitwinkelobjektiv. Der Winkel zwischen Sonne und Mond betrug rund 90 Grad. Wie zu erwarten, blickt der Mond gemäß den Regeln der geometrischen Optik direkt zur Sonne. Sein gelegentliches Schielen ist tatsächlich nur eine Sinnestäuschung.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: H.-J. SCHLICHTING

Geeignete Kopfbewegungen beenden das Schielen des Monds. Der Kopf muss sich dafür um eine Achse (rote Linie) drehen, die senkrecht auf der von Mond, Sonne und Beobachter aufgespannten Ebene steht. Die in dieser Ebene liegende Linie, also der Lichtweg, krümmt sich dann nicht und das Schielen bleibt aus. Analog dazu die Fotos: Der vor einer Wand stehende Fotograf richtet das Objektiv (analog zum Kopf des Beobachters) nach links (Blick zum Mond, *a*), nach vorn (*b*) und schließlich nach rechts (Blick zur Sonne, *c*). Auch hier steht die Drehachse senkrecht auf der von den Bezugspunkten aufgespannten Ebene. Die in dieser Ebene liegende Linie – auf halber Höhe der Fotos zu sehen – entspricht dem Lichtweg. Und tatsächlich: Sie krümmt sich nicht.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MIKE BECKERS

direkt ins Antlitz (Foto S. 57). Man muss allerdings genau hinschauen, denn er erscheint dann so klein, dass seine Blickrichtung nur mit Mühe zu erkennen ist.

Der Mond lässt das Schielen aber auch, wenn wir von der Nordhalbkugel in Richtung Süden reisen. Je näher wir nämlich der Region zwischen den Wendekreisen kommen, desto mehr nimmt die Mondsichel die Form eines Nachens an, weist ihre »Öffnung« also nach oben. Die türkische Nationalflagge etwa zeigt noch einen Mond, der zur Seite geöffnet ist, während er sich auf der Flagge des südlicher gelegenen Mauretanien nach oben öffnet. Dort steht der Mond mehr oder weniger senkrecht über der Sonne, weshalb allenfalls ein kleiner seitlicher Perspektiveneffekt ins Spiel kommt. Problematisch wird es also nur, wenn – wie in unseren Breiten – größere horizontale Abweichungen zwischen Sonnen- und Mondposition auftreten.

Wir brauchen aber nicht zwingend eine Weitwinkelaufnahme, um den Effekt aufzuheben. Stattdessen können wir auch den Kopf so neigen, wie er in Äquatornähe natürlicherweise orientiert wäre, und dann – als ob wir ein »Ja« ausdrücken wollten – mit dem Kopf nicken.

Das funktioniert, weil wir den Kopf dabei um eine Achse senkrecht zu einer Ebene drehen, die durch Sonne, Mond und Beobachter aufgespannt wird – nun kann der Mond schon aus Symmetriegründen nicht schielen (siehe Grafik oben). Der Augenschein ist also überlistet und der gesunde Menschenverstand zufrieden gestellt.

Man kann den Kopf auch noch auf eine weitere – und bequemere – Art um diese Achse drehen. Dazu neigt man ihn so, dass eine Parallele der Verbindungslinie Sonne-Mond durch die Ohren verläuft, und bewegt ihn wie bei einem »Nein«; dann ist ein schielender Mond ebenfalls ausgeschlossen.

Am überzeugendsten ist schließlich eine Schnur, die man so vor die Augen spannt, dass sie Mond und Sonne scheinbar verbindet. Man muss den Trick selbst ausprobiert haben, um sich von seiner Wirksamkeit zu überzeugen: Diesmal verschwindet das vermeintliche Schielen auf einen Schlag. ~

DER AUTOR

H. Joachim Schlichting war bis 2011 Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. 2008 erhielt er für seine didaktischen Konzepte den Pohl-Preis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.

QUELLEN

Glaeser, G., Schott, K.: Geometric Considerations About Seemingly Wrong Tilt of Crescent Moon. In: KoG – Scientific-Professional Journal of Croatian Society for Geometry and Graphics 13, S. 19–26, 2009

Minnaert, M.: Licht und Farbe in der Natur. Birkhäuser, Basel, Boston, Berlin 1992, S. 190–191

Steinrücken, B.: Über gerade und gekrümmte Linien am Himmel – oder: Warum zeigt die Mondsichel nicht genau zur Sonne? Download unter http://sternwarte.istplanbar.net/acms/data/uploads/dateien/pdf/mondsichel.pdf

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1159815

Unsere Neuerscheinungen

STERNE UND WELTRAUM 10/2012

Sterne und Weltraum bietet monatlich eine umfassende Weltraumperspektive für alle, die von der kosmischen Umgebung unserer Erde fasziniert sind. Experten ihres Fachs beschreiben für Sie das spannende Geschehen im Weltall. Themen der aktuellen Ausgabe sind:

> Erkundung des Sonnensystems: Von den Anfängen bis Curiosity
> Kosmische Strahlung: Blick ins All seit 100 Jahren
> Frühes Universum: Wann entstanden die schweren Elemente?
> Airglow: Seltene Erscheinung über Deutschland

Sterne und Weltraum kostet € 7,90 als Einzelheft und ist auch im Abonnement (12 Ausgaben pro Jahr) für € 85,20 inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 64,–) zu beziehen.

Ahnerts

ASTRONOMISCHES JAHRBUCH 2013

Wo und wann ist welcher Planet am Himmel zu sehen? Welche besonderen Ereignisse sind in der kommenden Nacht zu beobachten? **Ahnerts Astronomisches Jahrbuch 2013** liefert alle wichtigen Informationen für das eigene Erkunden des Sternenhimmels. Der Kalender präsentiert Tag für Tag die bedeutendsten astronomischen Ereignisse. Sternkarten für jeden Monat, Beschreibungen der Himmelsobjekte und viele Astroaufnahmen erleichtern Ihnen die Orientierung am Nachthimmel. Für Einsteiger und fortgeschrittene Sternfreunde ist der **Ahnert** das unentbehrliche Standardwerk.

Zirka 210 Seiten mit zahlreichen, meist farbigen Fotografien und Grafiken. € 10,90 zzgl. Porto, als Standing Order € 8,50 inkl. Inlandsversand, ISBN: 978-3-941205-79-6, ab 28. 9. 2012 im Handel oder unter www.spektrum.com/ahnert zu bestellen.

Spektrum Spezial – Physik · Mathematik · Technik 3/2012

ERDE 3.0: DIE ENERGIE DER ZUKUNFT

Damit die Erde eine Zukunft hat, gilt es jenseits von Erdöl, Gas und Kohle Energiequellen zu erschließen und zu nutzen, die sauber sind und sich nicht erschöpfen. Gerade jetzt, da die Bundesregierung die Energiewende eingeläutet hat und energisch vorantreibt, ist es wichtig zu wissen, welche Möglichkeiten wir haben, von fossilen Rohstoffen unabhängig zu werden. In diesem Heft von **Spektrum der Wissenschaft** beleuchten Experten und Wissenschaftsjournalisten die Chancen und Probleme der verschiedenen Optionen für eine nachhaltige, umweltfreundliche Energieversorgung der Welt.

Das Spezial »Erde 3.0 – Die Energie der Zukunft« kostet € 8,90 zzgl. Versand.
Die Spezial-Reihen können auch unter www.spektrum.de/spezialabo bezogen werden.

Serie Kindesentwicklung Nr. 7

ERZIEHUNG ZUM MITEINANDER

Der Umgang mit anderen Menschen fällt vielen Kindern nicht leicht. Manche sind einfach zu schüchtern, manche verhalten sich aggressiv, andere werden von Gleichaltrigen sogar regelmäßig ausgegrenzt. Woran liegt das? Und was können Eltern und Pädagogen tun, damit Kinder Selbstvertrauen gewinnen und besser in die Gemeinschaft hineinfinden? Der siebte Teil unserer **Serie Kindesentwicklung** rückt die Förderung von sozialen und emotionalen Fähigkeiten in den Fokus. Aus dem Inhalt:

> Spezial: Wie entsteht ADHS?
> Riskantes Spielen fördert das Selbstvertrauen
> Was bringen Ganztagsschulen?

Das Spezial Kindesentwicklung Nr. 7 »Erziehung zum Miteinander« kostet € 8,90.
Weitere Hefte der Reihe finden Sie unter: www.gehirn-und-geist.de/serie

Alle Hefte sind im Handel erhältlich oder unter:

Spektrum DER WISSENSCHAFT
WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

online: spektrum.de/lesershop
E-Mail: service@spektrum.com
Tel.: +49 6221 9126-743

Fax: +49 6221 9126-751
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg

INTERVIEW

Der LHC nach Higgs: Die Suche bleibt spannend

Am 4. Juli 2012 verkündeten Physiker des europäischen Forschungszentrums CERN, am Beschleuniger LHC ein neues Teilchen entdeckt zu haben. Es könnte sich um das schon 1964 postulierte Higgs-Boson handeln – der letzte noch fehlende Baustein des Standardmodells der Elementarteilchenphysik. Über die Bedeutung des Funds hat »Spektrum der Wissenschaft« mit **Siegfried Bethke** gesprochen. Der Direktor am Max-Planck-Institut für Physik in München spielt eine führende Rolle am CERN und ist maßgeblich am LHC-Experiment ATLAS beteiligt.

Spektrum der Wissenschaft: Herr Professor Bethke, das Higgs-Boson, das nun mutmaßlich nachgewiesen wurde, soll Elementarteilchen ihre Masse verleihen. Erklärt es somit auch, warum wir selbst etwas wiegen?

Siegfried Bethke: Wir müssen zwei Massebegriffe unterscheiden. Da ist zum einen die Masse der Elementarteilchen, also die Masse von fundamentalen Partikeln wie den Elektronen, Quarks oder den Kraftteilchen. Für sie ist das Higgs zuständig. Zum anderen ist da die makroskopische Masse, die wir aus dem Alltag kennen. Wenn ein Gegenstand, sagen wir, 100 Kilogramm auf die Waage bringt, dann ergibt sich seine Masse aus den Atommassen. Die Masse eines Atoms ist aber eben nicht einfach die Summe, die man erhält, wenn man die Massen der jeweils drei Quarks zusammenrechnet, aus denen die Kernbausteine, also Protonen und Neutronen, bestehen. Dieser Wert ist makroskopisch sogar fast vernachlässigbar. Stattdessen ergibt sich die Atommasse vor allem aus der enorm starken Bindungsenergie der Quarks – und die ist laut Einsteins Relativitätstheorie äquivalent zur Masse. Selbst wenn Quarks masselos wären, würden die Gegenstände in unserer Welt also fast nicht an Gewicht verlieren. Anders gesagt: Mit der makroskopischen Masse hat das Higgs kaum etwas zu tun, wohl aber mit der Masse von Elementarteilchen.

> »Der Nachweis des neuen Teilchens ist äußerst spannend. Aber vor allem suchen wir nach **neuer Physik** jenseits des Standardmodells«

Was genau haben die LHC-Forscher denn jetzt entdeckt?

Bethke: Sie haben an den beiden Detektoren ATLAS und CMS ein Teilchen mit einer Masse von 125 bis 126 Gigaelektronvolt entdeckt, bei dem es sich um das lang gesuchte Higgs-Teilchen handeln könnte. Als das CERN den Fund verkündete, lag die Signifikanz der Messung bei fünf Sigma. Die Wahrscheinlichkeit, dass es sich um eine Fehlmessung handelte, betrug weniger als eins zu drei Millionen. Mittlerweile ist die Signifikanz sogar auf sechs Sigma gestiegen. Mit Sicherheit ist das Teilchen ein Boson, trägt also ganzzahligen Spin, und es deutet auch alles darauf hin, dass wir tatsächlich auf ein Spin-0-Teilchen gestoßen sind, wie es das Higgs-Boson sein muss. Um es endgültig als Higgs zu identifizieren, brauchen wir allerdings noch weitere Untersuchungen.

Das Higgs ist der letzte noch nicht nachgewiesene Baustein im Standardmodell der Elementarteilchenphysik. Wie bedeutend ist der neue Fund?

Bethke: Das ist in jedem Fall äußerst spannend, wie jedes Mal, wenn ein neues Teilchen entdeckt wird. Aber man muss unterscheiden. Wenn es sich als das Higgs entpuppt, das vom Standardmodell vorausgesagt wird, dann erklärt es uns, wie die Teilchen zu ihren Massen kommen. Der Nachweis des Higgs ist aber fast eine Standardaufgabe, die wir einfach abhaken wollen. Vor allem suchen wir nach einer neuen Physik, nach einer Physik jenseits des Standardmodells der Teilchenphysik. Wir wissen, dass da etwas sein muss, denn das Standardmodell lässt eine Reihe fundamentaler Fragen offen.

Siegfried Bethke ist Direktor am Max-Planck-Institut für Physik. Im Leitungsgremium des europäischen Forschungszentrums CERN vertritt er Deutschland und die Interessen der deutschen Teilchenphysiker. Sein Team entwickelte große Teile des LHC-Detektors ATLAS, darunter die äußeren Myonenkammern, mit denen sich einer der Hauptzerfallskanäle des Higgs-Bosons vermessen lässt. Ebenfalls zur Abteilung gehören Sandra Kortner, Leiterin der 300-köpfigen Higgs-Gruppe innerhalb des 3000-köpfigen internationalen ATLAS-Teams, sowie ATLAS-Computing Coordinator Hans von der Schmitt.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MANFRED ZENTSCH

Insbesondere für Stringtheoretiker wäre es extrem aufregend, wenn sich das neue Teilchen als supersymmetrisch erweisen würde. Die Stringtheorie versucht, alle vier Grundkräfte zu einer einheitlichen Theorie zusammenzufassen. Dabei setzt sie die so genannte Supersymmetrie oder kurz Susy zwingend voraus. Laut Susy existiert zwischen Bosonen, den Teilchen mit ganzzahligem Spin, und Fermionen, solchen mit halbzahligem Spin, eine fundamentale Symmetrie. Nachgewiesen wurde sie bislang aber nicht. Wenn sich am LHC kein entsprechender Hinweis findet, haben die Stringtheoretiker also ein echtes Problem.

Besteht denn die Möglichkeit, dass die Forscher statt auf das Standardmodell-Higgs auf ein Susy-Teilchen gestoßen sind?

Bethke: Durchaus, der neue Fund könnte auch ein Susy-Higgs sein. Dann wäre es vermutlich das leichteste aus einer ganzen Serie von mindestens fünf supersymmetrischen Higgs-Teilchen, und in der nächsten Zukunft würde man am LHC möglicherweise noch weitere davon entdecken. Aber die Supersymmetrie besitzt so viele frei wählbare Parameter, dass sie zahlreiche unterschiedliche Entdeckungen im Nachhinein erklären, aber wenig voraussagen kann. Es wäre ein großer Zufall, wenn diese Parameter in der physikalischen Realität genau jene Werte annehmen, bei denen das Susy-Higgs dem Standardmodell-Higgs stark ähnelt. Möglich ist das aber.

Wie viel hat das neue Teilchen denn überhaupt mit der Stringtheorie zu tun?

Bethke: Erst einmal sehr wenig. Die Stringtheorie hat keine Vorhersagen über das Standardmodell-Higgs gemacht, die wir jetzt überprüfen könnten. Der Fund würde die Stringtheorie nur dann voranbringen, wenn er ein Susy-Teilchen wäre.

Falls sich Susy bei den am LHC erreichbaren Energien auch in den kommenden Jahren nicht zeigen sollte, wird es schwierig. Die Theoretiker können ihre Parameter zwar stets so verändern, dass dann eben bei höheren Energien mit entsprechenden Hinweisen zu rechnen ist. Aber solche konstruierten Parameterräume würden die Supersymmetrie immer unwahrscheinlicher erscheinen lassen.

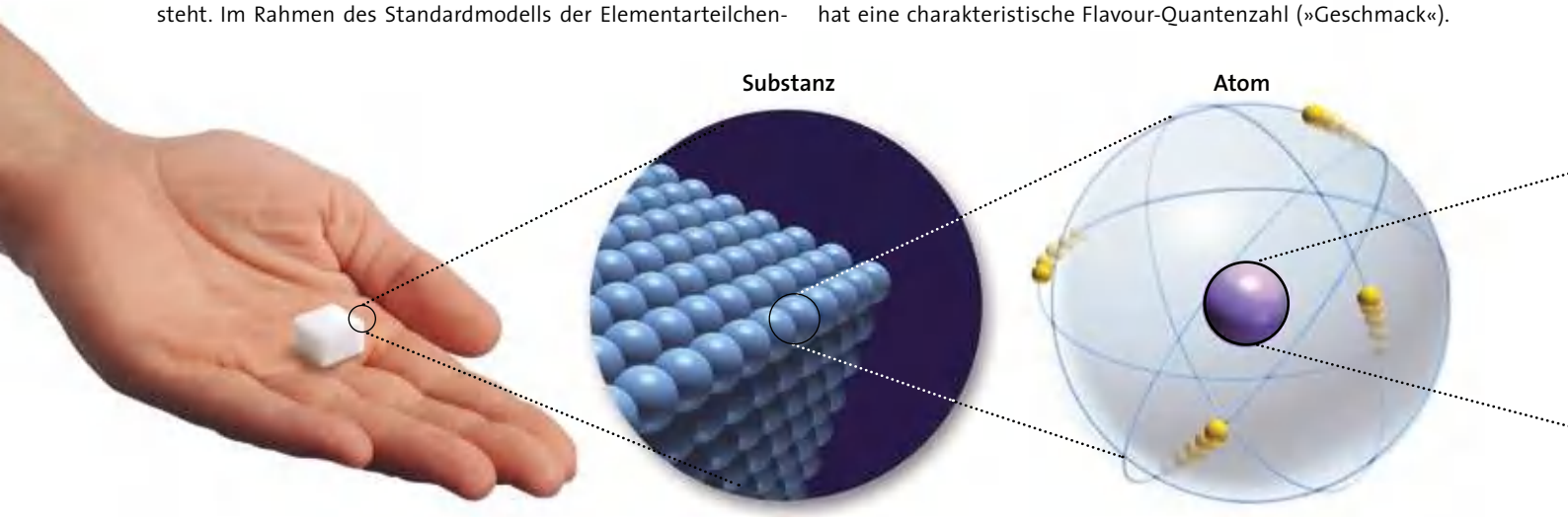
Die Entdeckung fällt allerdings in eine Zeit, in der sich allmählich das Bewusstsein der Stringtheoretiker entwickelt, dass sie ihre Theorie auch phänomenologisch verankern sollten. Sie müssen also Voraussagen treffen, die in Experimenten überprüft werden können. Diese Haltung entwickelt sich gerade erst und ist noch nicht weit verbreitet. Andererseits gibt es Theoretiker wie Dieter Lüst, der ebenfalls Direktor hier am MPP, dem Max-Planck-Institut für Physik, ist, die schon entsprechende Anstrengungen unternehmen. Gemeinsam mit Kollegen hat er aus der Stringtheorie Effekte abgeleitet, die sich am LHC messen lassen könnten. Sie würden auf die Existenz von zusätzlichen Raumdimensionen hinweisen, wie sie von der Stringtheorie vorhergesagt werden. Diese Vorhersage soll sogar nur wenig von den gewählten Parametern abhängen.

Was versprechen Sie selbst sich von der Stringtheorie?

Bethke: Als experimenteller Physiker habe ich mich mit der ihr zu Grunde liegenden Supersymmetrie nie so recht anfreunden können. Schon im Standardmodell, mit dem Teilchenphysiker fast alle ihre Beobachtungen erklären können, gibt es rund 25 freie Parameter. Die können wir nicht aus der

Was die Welt im Innersten zusammenhält

Der Blick ins Innere eines Stückchens Materie verrät, dass es letztlich nur aus ganz wenigen Sorten fundamentaler Bausteine besteht. Im Rahmen des Standardmodells der Elementarteilchenphysik kennen die Physiker ein Dutzend elementarer Materieteilchen, so genannte Quarks und Leptonen. Jedes der zwölf Teilchen hat eine charakteristische Flavour-Quantenzahl (»Geschmack«).



Quarks

Aus ihnen bestehen Protonen, Neutronen und ein regelrechter Zoo sehr kurzlebiger Teilchen. Quarks tragen eine so genannte Farbladung (rot, grün oder blau) und wurden nie einzeln beobachtet.

up u
elektrische Ladung: +2/3
Masse: 2 MeV
Baustein der gewöhnlichen Materie. Zwei up-Quarks und ein down-Quark ergeben ein Proton.

charm c
elektrische Ladung: +2/3
Masse: 1,25 GeV
Instabiler Verwandter des up-Quarks mit größerer Masse. Bestandteil des J/ψ-Teilchens, das bei der Konzeption des Standardmodells eine Rolle spielte.

top t
elektrische Ladung: +2/3
Masse: 173 GeV
Schwerstes bekanntes Teilchen. Seine Masse entspricht etwa derjenigen eines Wolframatoms.

down d
elektrische Ladung: –1/3
Masse: 5 MeV
Baustein der gewöhnlichen Materie. Zwei down-Quarks und ein up-Quark ergeben ein Neutron.

strange s
elektrische Ladung: –1/3
Masse: 95 MeV
Instabiler Verwandter des down-Quarks mit größerer Masse. Baustein des Kaons, eines sehr gründlich untersuchten Teilchens.

bottom b
elektrische Ladung: –1/3
Masse: 4,2 GeV
Instabiler Verwandter des down- und des strange-Quarks mit noch höherer Masse. Bestandteil des intensiv untersuchten B-Mesons.

Leptonen

Diese Teilchen sind immun gegen die starke Kraft und lassen sich einzeln beobachten. Die hier gezeigten Neutrinos treten in Wahrheit als Mischungen voneinander auf. Ihre genauen Massen sind unklar, betragen aber maximal einige wenige Elektronvolt.

Elektron-Neutrino ν_e
elektrische Ladung: 0
Immun gegen die elektromagnetische und die starke Kraft. Es tritt deshalb kaum mit Materie in Wechselwirkung, spielt jedoch eine Rolle beim radioaktiven Zerfall.

Myon-Neutrino ν_μ
elektrische Ladung: 0
Taucht bei Reaktionen auf, die in Zusammenhang mit der schwachen Wechselwirkung stehen und an denen Myonen beteiligt sind.

Tau-Neutrino ν_τ
elektrische Ladung: 0
Eine weitere Variante des Neutrinos, die bei Reaktionen mit Tau-Leptonen eine Rolle spielt.

Elektron e
elektrische Ladung: –1
Masse: 0,511 MeV
Das leichteste geladene Teilchen, bekannt als Träger elektrischer Ströme. Aus ihm besteht die Hülle von Atomen.

Myon μ
elektrische Ladung: –1
Masse: 106 MeV
Schwerere Variante des Elektrons mit einer Lebensdauer von 2,2 Mikrosekunden. Wurde in der kosmischen Strahlung entdeckt.

Tau τ
elektrische Ladung: –1
Masse: 1,78 GeV
Weitere instabile und noch schwerere Variante des Elektrons mit einer Lebensdauer von 0,3 Pikosekunden.

Bosonen

Jede Wechselwirkung wird durch ein eigenes Teilchen / eine Teilchengruppe übertragen. Nur der endgültige Nachweis des Higgs-Teilchens steht noch aus.

Photon γ
elektrische Ladung: 0
Masse: 0
Überträger der elektromagnetischen Kraft. Lichtquanten wirken über unbegrenzte Entfernungen hinweg auf elektrisch geladene Teilchen.

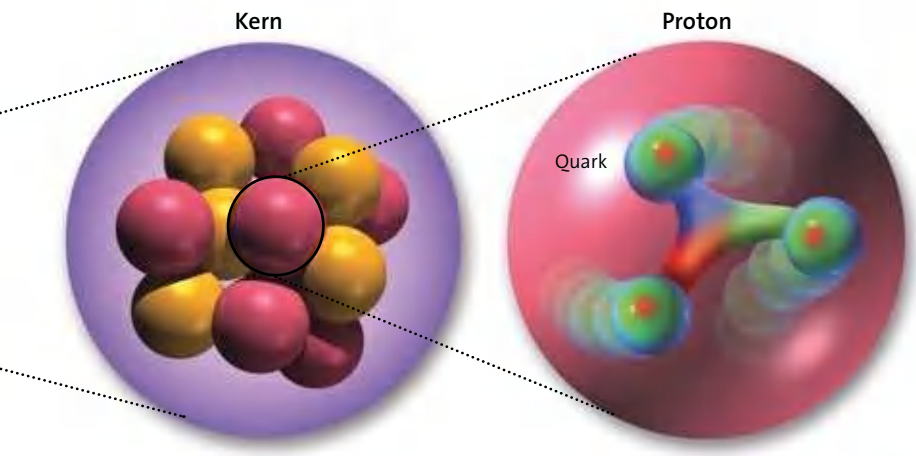
Z-Boson Z
elektrische Ladung: 0
Masse: 91 GeV
Überträger der schwachen Wechselwirkung bei Reaktionen, welche die Identität der Teilchen nicht ändert. Seine Reichweite beträgt nur etwa 10^{-18} Meter.

W^+/W^--Bosonen W
elektrische Ladung: +1 oder –1
Masse: 80,4 GeV
Überträger der schwachen Wechselwirkung bei Reaktionen, bei denen sich der »Geschmack« (Flavour) und die Ladung der Teilchen ändern. Auch ihre Reichweite beträgt nur 10^{-18} Meter.

Gluonen g
elektrische Ladung: 0
Masse: 0
Acht verschiedene Gluonen übertragen die starke Wechselwirkung, wobei sie auf Quarks und andere Gluonen wirken. Sie sind immun gegen die elektromagnetische und schwache Wechselwirkung. Ihre Reichweite beträgt weniger als 10^{-15} Meter.

Higgs (2012 mutmaßlich am LHC beobachtet) H
elektrische Ladung: 0
Masse: 125–126 GeV
Soll Quarks, Leptonen und Z-/W-Bosonen mit Masse ausstatten. Seine Existenz würde darauf hindeuten, dass der Kosmos von einem so genannten Higgs-Feld erfüllt ist.

Hinzu kommen die Bosonen. Diese sind Wechselwirkungsteilchen, sie übertragen also Kräfte. Das Standardmodell behandelt all diese Partikel als geometrische Punkte ohne Ausdehnung; die Größen spiegeln hier ihre Massen wider.

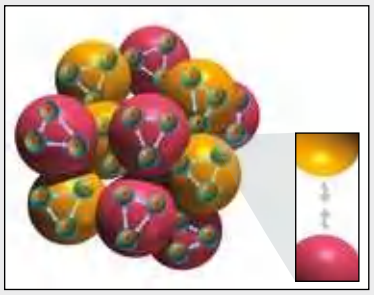


Wie die Kräfte wirken

Bei der Wechselwirkung zwischen mehreren kollidierenden Teilchen können sich deren Energie, Impuls und Typ ändern. Aber auch ein einzelnes, isoliertes Teilchen kann auf Grund einer solchen Wechselwirkung spontan zerfallen.

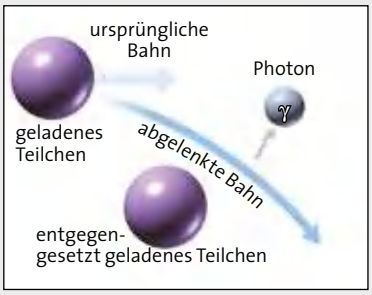
Starke Wechselwirkung

Sie wirkt auf Quarks und Gluonen und bindet diese aneinander, so dass Protonen, Neutronen und andere »Hadronen« entstehen. Indirekt bewirkt sie auch den Zusammenhalt zwischen Protonen und Neutronen in Atomkernen.



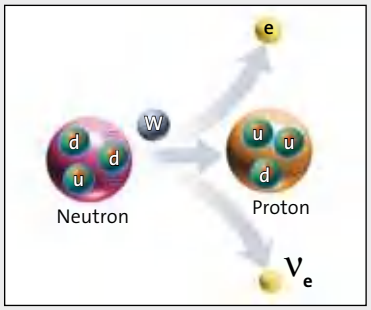
Elektromagnetismus

Die elektromagnetische Kraft wirkt auf geladene Teilchen, ohne sie zu verändern. Sie sorgt dafür, dass sich entgegengesetzt geladene Teilchen anziehen und solche mit gleichnamiger Ladung abstoßen.



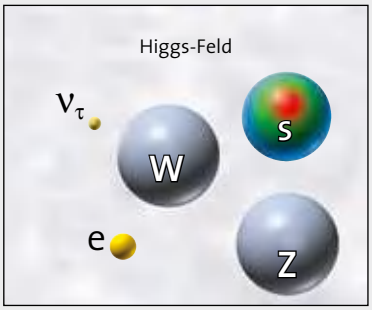
Schwache Wechselwirkung

Sie wirkt auf Quarks und Leptonen. Ihr bekanntester Effekt, der radioaktive Betazerfall, ist die Umwandlung eines d- in ein u-Quark. Dabei wird ein Neutron zu einem Proton; zusätzlich entstehen ein Elektron und ein Neutrino.



Higgs-Wechselwirkung

Laut Standardmodell erfüllt das Higgs-Feld den Raum wie ein Sirup, der die W- und Z-Bosonen bremst und so die Reichweite der schwachen Kraft herabsetzt. Quarks und Leptonen erhalten durch Wechselwirkung mit ihm eine Masse.



SLIM FILMS

Theorie ableiten, sondern nur durch Messung ermitteln, darunter so wichtige wie die Massen der Teilchen und die Kopplungsstärken der fundamentalen Wechselwirkungen. Die Supersymmetrie ist zwar logisch und ästhetisch sehr rund. Aber sie verfünffacht die Zahl der freien Parameter und stellt jedem Elementarteilchen einen Superpartner zur Seite. Und das hilft mir natürlich überhaupt nicht weiter, wenn ich experimentell die Welt beschreiben will.

Was ist zu tun, um die Identität des neuen Teilchens zweifelsfrei zu klären?

Bethke: Wenn Susy existiert, kommen bei den Protonenkollisionen am LHC auch supersymmetrische Quarks und so weiter ins Spiel. Dies würde die Zerfallsraten des Susy-Higgs stark beeinflussen. An den Abweichungen gegenüber den vom Standardmodell vorausgesagten Higgs würden wir es dann erkennen, denn außer der Masse wissen wir theoretisch alles über das Higgs. Wir brauchen jetzt also wesentlich mehr Messungen, um die Zerfallsraten zu bestimmen.

Da der LHC-Beschleuniger und die Detektoren sehr effektiv und rundlaufen, könnten wir allein in diesem Jahr fünfmal mehr Daten erfassen, als wir bis Ende 2011 gewonnen haben. Das wäre fantastisch. Außerdem wird der Beschleuniger einige Monate später als geplant zu Wartungszwecken heruntergefahren, nämlich erst im Februar oder März 2013. Die letzten vier Wochen sind allerdings wieder den Experimenten vorbehalten, bei denen statt Protonen schwere Bleiionen aufeinandergeschossen werden. Dabei geht es unter anderem darum, das so genannte Quark-Gluon-Plasma zu untersuchen, einen Materiezustand, wie er unmittelbar nach dem Urknall geherrscht haben dürfte (siehe »Die Jagd nach dem Quark-Gluon-Plasma«, SdW 5/2011, S. 86; *die Red.*).

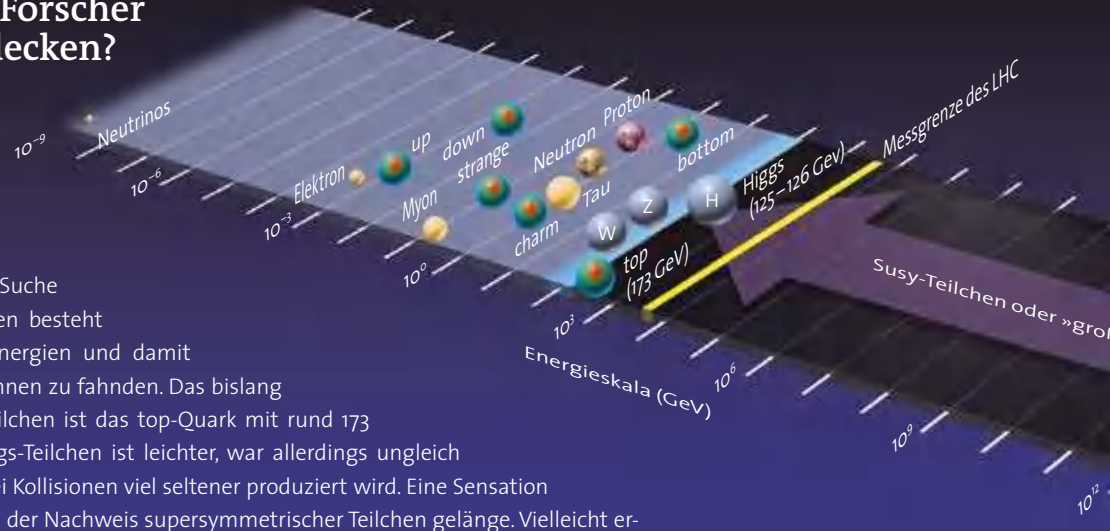
Welche Erkenntnisse bietet der LHC bislang noch?

Bethke: Die Suche gilt tatsächlich nicht nur dem Higgs. Natürlich wird der gesamte Masse- und Energiebereich auch nach anderen neuen Signalen abgesucht. Beispielsweise fahnden die Forscher mit viel Ehrgeiz nach Gluinos. Das sind die supersymmetrischen Partner der Gluonen, also jener Kraftteilchen, die die starke Kernkraft vermitteln. Und sie suchen nach den Superpartnern von Elektronen und Quarks. Außerdem könnten in den Daten Signale wie die von Dieter Lüst vorher-

gesagten auftauchen, die auf höhere Dimensionen jenseits unserer dreidimensionalen Welt hinweisen.

Zudem haben die Forscher ein besonders ehrgeiziges Ziel. Die Supersymmetrie wird ja nicht nur deshalb geliebt, weil sie schön symmetrisch ist, wie die Physiker das immer wollen, sondern weil sie auch einen Kandidaten für die Dunkle Materie liefert. Das war für mich persönlich ein vielleicht noch größerer Ansporn, am Bau des LHC mitzuwirken. Die Dunkle Materie stellt 85 Prozent der Masse im Universum, aber die Frage, woraus sie besteht, ist derzeit völlig ungeklärt. Der heißeste Kandidat ist das leichteste supersymmetrische Teilchen, das keine Ladung besitzt.

Was könnten die Forscher als Nächstes entdecken?



Eine der Strategien bei der Suche nach neuen Elementarteilchen besteht darin, bei immer höheren Energien und damit auch höheren Massen nach ihnen zu fahnden. Das bislang schwerste nachgewiesene Teilchen ist das top-Quark mit rund 173 GeV. Das (mutmaßliche) Higgs-Teilchen ist leichter, war allerdings ungleich schwerer zu finden, weil es bei Kollisionen viel seltener produziert wird. Eine Sensation wäre, wenn am LHC nun auch der Nachweis supersymmetrischer Teilchen gelänge. Vielleicht erstreckt sich im Bereich höherer Energien aber auch eine »große Wüste«, in der selbst mit noch größeren Beschleunigern keine fundamental neuen Erkenntnisse mehr zu gewinnen wären. Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik würde dann bis zu jenen extrem hohen Energien Gültigkeit besitzen, wie sie kurz nach dem Urknall geherrscht haben. Damals waren die Naturkräfte noch in einer einzigen Kraft vereint.

SLIM FILMS

Die (fast) vergessenen Daten

Sind veraltete Teilchenbeschleuniger und Experimente erst einmal abgeschaltet, gehen auch die gewonnenen Rohdaten allmählich verloren. Moderne Computer können die Speichermedien von einst schlicht nicht mehr lesen. LHC-Forscher Siegfried Bethke will die Daten retten, denn sie besitzen noch erheblichen wissenschaftlichen Wert.

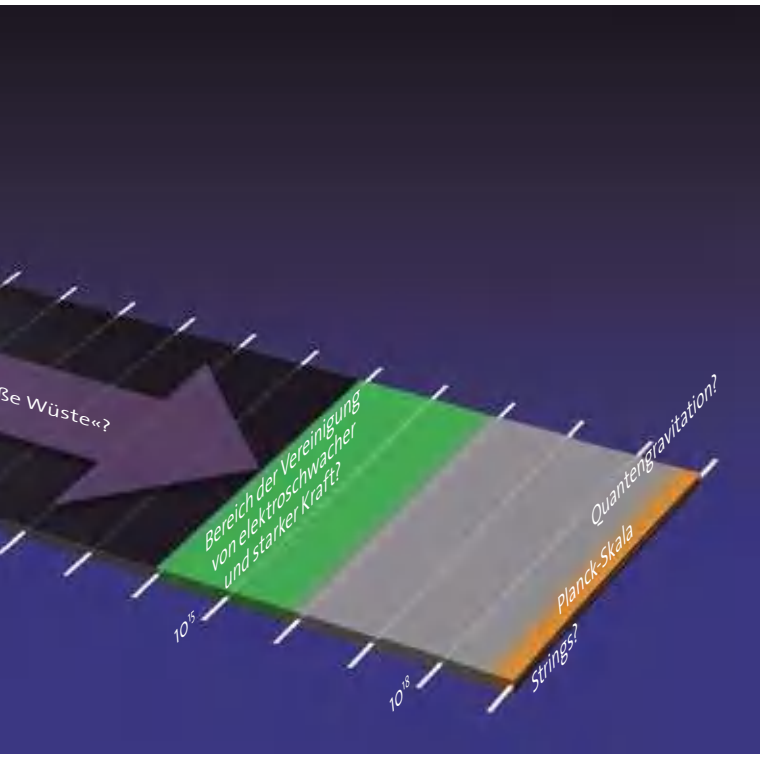
Immer größer werden die Beschleuniger, an denen Physiker ihre Theorien erproben und weitere fundamentale Bausteine unserer Welt zu entdecken hoffen. Ihre Vorgänger gehen derweil außer Betrieb. Zuletzt wurde 2011 das Tevatron am Fermilab in den USA abgeschaltet. 2007 ging die Hadron-Elektron-Ring-Anlage HERA am Hamburger DESY-Labor außer Betrieb. 2000 schossen die letzten Teilchen durch den Large Electron Positron Collider (LEP) am europäischen Forschungszentrum CERN. Er machte dem Large Hadron Collider (LHC) Platz, der im einstigen LEP-Tunnel errichtet wurde. PETRA, die Positron-Elektron-Tandem-Ring-Anlage am DESY, ist ebenfalls schon lange Geschichte, zumindest in ihrer ursprünglichen Ausbaustufe. 1979 hatte sie für Furore gesorgt, als Forscher darin erstmals das Gluon nachwiesen. Das Trägerteilchen der starken Wechselwirkung hält Quarks zusammen, und zwar so, dass je drei von ihnen die Protonen und Neutronen im Atomkern bilden.

Heute, so könnte man meinen, sind die damals gewonnenen Rohdaten für niemanden mehr von Interesse; sie wurden ausgewertet, und die Ergebnisse stehen fest. »Doch alte Daten aus der Teilchenphysik sind extrem wertvoll«, sagt Siegfried Bethke (siehe nebenstehendes Interview), einer der Direktoren am Münchner Max-Planck-Institut für Physik. »Teilweise wurden sie in niedrigen Energiebereichen gewonnen, in denen heute kein Mensch mehr misst«, erklärt er. »Unter anderem können sie uns zu neuen Erkenntnissen über die starke Wechselwirkung verhelfen.«

Als Bethke 1995 den Leibniz-Preis erhielt, nutzte er darum sein Preisgeld, um ein kleines Team aufzubauen. Mittlerweile konnten die Forscher unter anderem alte Messergebnisse von PETRA und LEP retten. Bis dahin hatten die Rohdaten das Schicksal aller digitalen Überlieferung geteilt: Meist waren sie nicht mehr lesbar, weil die Hardware von einst nicht mehr funktionierte, die um-

Wie steht es gegenwärtig um Hinweise auf diese neue Physik?

Bethke: Viele der entsprechenden Analysen sind schon veröffentlicht, sie beruhen vor allem auf den Daten bis Ende 2011. Leider konnten die Wissenschaftler keinerlei weitere Entdeckungen vermelden. Das gute alte Standardmodell triumphiert damit erneut. Aber es gelang, die Ausschlussgrenzen auszuweiten. Man weiß also: Unterhalb einer bestimmten Energie beziehungsweise Masse ist mit keinen neuen Effekten mehr zu rechnen. In fast allen Zerfallskanälen liegen diese Grenzen schon bei über einem Teraelektronvolt, zum Teil sogar erheblich darüber.



Das klingt nach einer schlechten Nachricht.

Bethke: Das ist keine schlechte, aber eine enttäuschende Nachricht. Wir hofften eben, die Natur hätte uns in diesem Massebereich ein bisschen mehr Aufregendes zu bieten. Nun müssen wir bei höheren Energien weitersuchen. Derzeit läuft der LHC ja erst auf halber Energie. Ab 2014 gehen wir dann höher bis zur vollen Energie von 14 Teraelektronvolt. Und selbst danach können wir das Energiefenster noch weiter nach oben öffnen.

Wie soll das gehen?

Bethke: Indem wir die Luminosität erhöhen. Dieser Begriff hängt eng mit der Strahlintensität zusammen und ist ein Maß für die Zahl der Protonenkollisionen, die im LHC-Tunnel pro Sekunde stattfinden. Je höher die Luminosität, desto mehr Daten bekommen wir also. Höhere Energie können wir teilweise durch höhere Strahlintensität ersetzen. Im LHC kollidieren in Wirklichkeit ja nicht Protonen, sondern die Quarks und Gluonen, aus denen sie sich zusammensetzen. Die drei Quarks jedes Protons besitzen jeweils nur etwa ein Drittel von dessen Energie. Kollidieren zwei Quarks miteinander, liegt die Energie der Kollision folglich bei nur etwa einem Neuntel des Maximalwerts. Doch das ist nur ein Mittelwert, denn die Quarks und Gluonen wechselwirken ständig miteinander, und dabei kann es schon einmal passie-

fangreiche Spezialsoftware auf heutigen Rechnern nicht mehr zum Laufen gebracht werden konnte oder niemand mehr ihre Funktionsweise verstand. Manchmal waren sie derart trickreich auf möglichst geringen Speicherplatzbedarf getrimmt worden, dass sie sich kaum rekonstruieren ließen. In wieder anderen Fällen waren die Magnetbänder nach einiger Zeit physisch zerstört worden – geschreddert –, weil man den Platz in den Archiven für Nachfolgeprojekte benötigte.

Ein wichtiger Datensatz beispielsweise, eine Luminositätstabelle, die zur Kalibrierung der PETRA-Messungen diente, schien unrettbar verloren. Doch dann holte ein ehemaliger DESY-Kollege Bethkes, als er sein Büro aufräumte, »meterweise altes Traktorpapier aus dem Schrank und fand dabei einen ASCII-Ausdruck der Tabelle, auf grünem Recyclingpapier und gerade noch lesbar«. In wochenlanger Handarbeit brachte Bethkes Sekretärin die Daten schließlich wieder in ein digitales Format.

Solche Anstrengungen lohnen sich. »Bei niedrigen Energien versagt die Theorie, weil die starke Wechselwirkung so extrem anwächst. Man ist daher auf experimentelle Daten angewiesen.« Diese Energieabhängigkeit der starken Wechselwirkung ist als asymptotische Freiheit bekannt, für ihre theoretische Formulierung 1973 erhielten David Gross, David Politzer und Frank Wilczek 2004 den Nobelpreis. Zentrale Vorhersagen dieser Theorie ließen sich jedoch lange nicht experimentell nachweisen. Die entsprechenden Analysen lieferten erst Bethke und seine Kollegen. Dank theoretischer und methodischer Fortschritte sowie schnellerer Computer erzielten sie bei der erneuten Auswertung der geretteten Rohdaten in den Jahren von 1995 bis heute viel präzisere Ergebnisse, als es einst den PETRA-Kollegen möglich war. »Auf diese Weise haben wir auch eine Menge über die Hadronisierung gelernt«, also über die fundamentale Frage, wie sich jeweils zwei oder drei Quarks zu anderen Elementarteilchen zusammenlagern.

Mit dem Problem der Datensicherung in der Hochenergiephysik befasst sich mittlerweile auch die internationale »Study Group on Data Preservation and Long Term Analysis in High Energy Physics« (DPHEP). Bethke gehört zu ihren Pionieren. Die finanziellen Mittel der Forschungsförderer würden zwar vorwiegend »für aufregende Projekte« fließen, sagt der Teilchenforscher. »Doch es ist eigentlich eine Sünde, solche wertvollen wissenschaftlichen Daten ihrem Schicksal der Vergänglichkeit zu überlassen.« **tk**

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MANFRED ZENTSCH

»Die Eigenschaften des neuen Teilchens zu untersuchen, ist ein ganzes Stück komplizierter als die reine Massenanalyse, die zu seiner Entdeckung nötig war«, betont Siegfried Bethke (rechts) im Gespräch mit »Spektrum«-Redakteur Thilo Körkel.

ren, dass ein Quark zumindest kurzfristig fast die gesamte Energie des Protons in sich vereint. Solche Ereignisse sind zwar selten, aber wenn wir die Zahl der Kollisionen erhöhen, finden sie häufiger statt und treten daher in der Statistik besser hervor.

Mit welchen Erkenntnissen können wir bis Ende des Jahres noch rechnen?

Bethke: Die Untersuchung des neuen Teilchens findet an den LHC-Detektoren ATLAS und CMS statt. Innerhalb des 3000-köpfigen ATLAS-Teams existiert eine Higgs-Gruppe mit rund 300 Mitgliedern, die von meiner MPP-Kollegin Sandra Kortner geleitet wird. Diese Gruppe hat sich auf das neue Teilchensignal gestürzt und untersucht seine Eigenschaften. Dies sind in erster Linie die schon angesprochenen relativen Zerfallsraten, also die Raten des Zerfalls in einen bestimmten Endzustand gemessen an der Gesamtheit der Zerfälle. Dann aber auch insbesondere der Spin. Dazu muss das Team unter anderem die Verteilung der Winkel bestimmen, unter denen die Zerfallsprodukte bei einer Kollision wegfliegen. Das ist ein ganzes Stück komplizierter als die reine Massenanalyse, die zur Entdeckung nötig war. Aber am Ende des Jahres wird man mit einiger Sicherheit sagen können, ob das Teilchen Spin 0 hat – und damit sicher ein Higgs-Boson wäre – oder vielleicht auch Spin 2, was allerdings sehr exotisch wäre. Aber letztlich lässt sich das alles nicht planen. Sind die Abweichungen von den vorhergesagten Ergebnissen groß, können wir mit wenig Daten früh eine Aussage treffen. Sind sie klein, müssen wir länger messen.

Welche weiteren Auswertungen nimmt Ihr Team gegenwärtig vor?

Bethke: Eine der Analysegruppen in der ATLAS-Abteilung am MPP schaut sich die Physik des top-Quarks sehr genau an, im Wesentlichen die Masse, aber auch den Wirkungsquerschnitt. Das top ist das schwerste Elementarteilchen überhaupt. Es besitzt fast so viel Masse wie ein Wolframatom und taucht in sehr vielen Zerfallskanälen auf, unter anderem dort, wo nach Susy-Signalen gesucht wird. Je präziser wir seine Eigenschaften kennen, desto genauer können wir auch andere Dinge messen, unter anderem die Masse des Higgs. Eine weitere Gruppe beschäftigt sich mit Hadronen, also mit Quarks und Gluonen. Dieses Team hat einen Teil des hadronischen Kalorimeters für ATLAS gebaut, das die Energie dieser Teilchen misst, und analysiert nun energiereiche Teilchenströme, die sich vom Kollisionspunkt wegbewegen – die so genannten hadronischen Jets.

Es bleiben also weiterhin alle Augen auf den LHC gerichtet?

Bethke: Das ist sicherlich so. Aber es gibt derzeit auch andere aufregende Entwicklungen. Das chinesische Daya-Bay-Experiment zum Beispiel hat im Frühjahr neue Werte für den dritten Mischungswinkel von Neutrinos veröffentlicht. Er ist ein Maß dafür, wie häufig Neutrinos sich von einem Typ in einen anderen verwandeln können – Physiker sprechen von Neutrino-Generationen. Er hängt mit der Verletzung der so genannten CP-Symmetrie und letztlich auch damit zusammen, warum im Universum praktisch nur Materie, aber keine Antimaterie existiert. Diese wichtige Frage können wir am LHC nicht klären, dafür brauchen wir spezielle Neutrinoexperimente.

Die Bedeutung des jüngsten Erfolgs am LHC mag für die Öffentlichkeit schwer fassbar sein. Umso mehr hat uns Teilchenphysiker das enorme öffentliche Interesse an diesen Ergebnissen und dem Projekt sehr positiv überrascht! Man sollte aber auch die unglaubliche technische und organisatorische Leistung der internationalen Forschergemeinde betonen, die allem vorangegangen ist. Allein zum ATLAS-Detektor haben rund 180 Institute unterschiedlichster Größe aus über 40 Ländern der Welt beigetragen, davon rund 15 Universitäten und Forschungsinstitute aus Deutschland, und das letztlich auf freiwilliger Basis. Es gibt zwar eine hochprofessionelle Managementstruktur mit dem so genannten »collaboration board« an der Spitze, in das jedes Institut einen Vertreter entsendet. Aber es gibt niemanden, der gegenüber den Institutsdirektoren eine Weisungsbefugnis gehabt hätte. Auch existieren praktisch keine rechtlich verbindlichen Verträge, sondern nur schriftliche Absichtserklärungen. Und schließlich verdankt sich der Erfolg einem oft zutiefst demokratischen Prozess. Als 2009 alle diese Anstrengungen darin mündeten, dass der LHC erfolgreich seinen Betrieb aufnahm, war das ein Schlüsselerlebnis für mich. ~

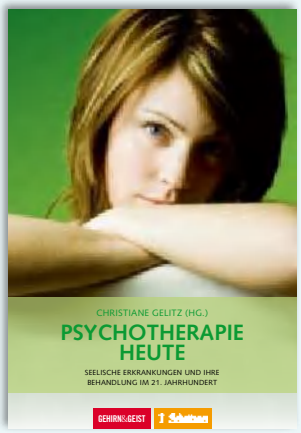
Die Fragen stellte »Spektrum«-Redakteur **Thilo Körkel**.

Gehirn&Geist im Buch!

Science-Shop.de

*»Unsere neue Buchreihe »Gehirn&Geist« ist das Ergebnis einer erfolgreichen Kooperation des Verlags **Spektrum der Wissenschaft** mit dem renommierten Medizin-Verlag **Schattauer**. Die ersten Bände vereinen die besten Essays aus unserem Magazin zu drei ausgewählten Forschungsgebieten und beleuchten diese aus verschiedensten Blickwinkeln.«*

(Katja Gaschler, Redakteurin bei Gehirn&Geist)



Christiane Gelitz (Hg.)

PSYCHOTHERAPIE HEUTE

Seelische Erkrankungen und ihre Behandlung im 21. Jahrhundert

2011, 200 S., 16 Abb., kart., Schattauer

Bestell-Nr. 3469 € 19,95 (D), € 20,60 (A)

ADHS bei Erwachsenen, Computerspielsucht, soziale Phobie, Borderline – Begriffe, die wie nie zuvor durch sämtliche Medien geistern. Aber was steckt dahinter? Wo sind die Grenzen zwischen Alltagsproblemen und ernsten psychischen Störungen? Und welche innovativen Therapieansätze gibt es dafür?

In wissenschaftlich fundierten und zugleich verständlichen Beiträgen stellen Psychologen, Psychiater, Psychotherapeuten und Medizinjournalisten das Spektrum der wichtigsten psychischen Störungen sowie erfolgreiche Therapieansätze vor.

Psychotherapie Heute verschafft einen ebenso instruktiven wie spannenden Überblick über neue Störungsbilder und die Fortschritte der Therapieforschung. Dieser ist nicht nur für Mediziner und Therapeuten von Bedeutung, sondern auch für alle an Psychotherapie und den Neurowissenschaften Interessierten.

Andreas Jahn (Hg.)

WIE DAS DENKEN ERWACHTE

Die Evolution des menschlichen Geistes

2011, 160 S., 20 Abb., kart., Schattauer

Bestell-Nr. 3470 € 19,95 (D), € 20,60 (A)

Wie entstanden unser Denken und unsere Sprache? Wie intelligent sind wir wirklich? Was empfinden wir als attraktiv?

Über alle Fachgebiete hinweg belegen renommierte Verhaltensforscher, Genetiker, Psychologen, Philosophen und Biologen, dass unser Denken und Verhalten auf unserem biologischen Erbe beruhen: Der Mensch ist ein Kind der Evolution. Erfahren Sie, wie und wieso wir wurden, was wir heute sind.

Wie das Denken erwachte empfiehlt sich allen Leserinnen und Lesern, die mehr über Neurowissenschaften und Evolution erfahren möchten. Das Buch ist gleichzeitig eine Fundgrube für Psychologen und Naturwissenschaftler.

Katja Gaschler, Anna Buchheim (Hg.)

KINDER BRAUCHEN NÄHE

Sichere Bindungen aufbauen und erhalten

2011, 160 S. m. 27 Abb., kart., Schattauer

Bestell-Nr. 3468 € 19,95 (D), € 20,60 (A)

Dieses Buch ist kein Erziehungsratgeber im üblichen Sinn. Vielmehr präsentiert es wichtige Ergebnisse der Bindungsforschung und leitet daraus ab, wie sich eine vertrauensvolle Beziehung zu Kindern aufbauen lässt. Denn eine sichere Bindung ist nicht nur entscheidend für eine gelingende Erziehung. Sie fördert auch nachweislich die seelische Gesundheit und den sozialen Erfolg im späteren Leben.

Vor diesem Hintergrund bietet *Kinder brauchen Nähe* profunde Einblicke in Themen wie kindliche Schlafprobleme, Schreibabys, Trotzverhalten und Scheidungskinder. Pädagogen, Psychologen und Psychotherapeuten zeigen in forschungsbasierten und zugleich unterhaltsamen Beiträgen, wie prägend die Qualität der Bindungen eines Kindes für seine Entwicklung ist.

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich

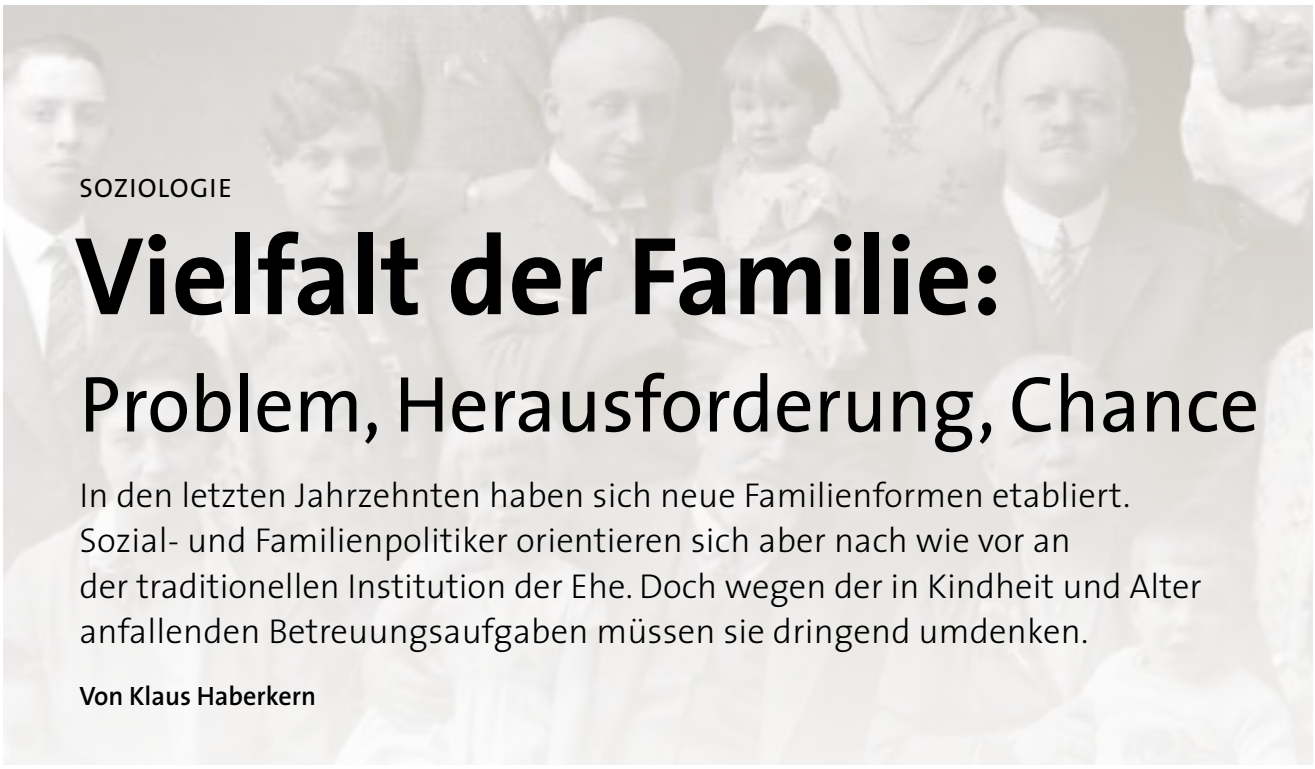
Besuchen Sie uns im Internet unter: www.science-shop.de

Bestellen Sie direkt: +49 6221 9126-841 @ info@science-shop.de

Bequem bestellen:

- **→ direkt bei** www.science-shop.de
- **→ per E-Mail** info@science-shop.de
- **→ telefonisch** +49 6221 9126-841
- **→ per Fax** +49 711 7252-366
- **→ per Post** Postfach 810680 • 70523 Stuttgart

Für Bestellungen außerhalb Deutschlands und Österreichs berechnen wir € 3,50 Versandkosten. Alle Preise inkl. Umsatzsteuer. Preise unter Vorbehalt. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH



SOZIOLOGIE

Vielfalt der Familie:

Problem, Herausforderung, Chance

In den letzten Jahrzehnten haben sich neue Familienformen etabliert. Sozial- und Familienpolitiker orientieren sich aber nach wie vor an der traditionellen Institution der Ehe. Doch wegen der in Kindheit und Alter anfallenden Betreuungsaufgaben müssen sie dringend umdenken.

Von Klaus Haberkern

Zwei Frauen lieben einander und entscheiden sich für ein gemeinsames Leben, wollen dabei aber auf Mutterschaft nicht verzichten. Dank der Möglichkeit, eine Lebenspartnerschaft eintragen zu lassen, anonymisierten Samenbanken und In-vitro-Fertilisation sind das heutzutage in der Bundesrepublik durchaus erfüllbare Wünsche. Die Kinder wachsen dann unter der Obhut der gleichgeschlechtlichen Eltern als Geschwister auf, ohne biologisch miteinander verwandt zu sein. Ihre beste Freundin hingegen lebt in einer traditionellen Kleinfamilie, in der die leiblichen Eltern verheiratet sind und einen gemeinsamen Haushalt führen. Ein anderer Spielkamerad wiederum kommt aus einer Patchworkfamilie oder ist von einem kinderlosen Paar adoptiert worden.

AUF EINEN BLICK

AUSLAUFMODELL FAMILIE?

1 Die klassische Familie aus Ehemann und Ehefrau, Kindern und Großeltern wird zunehmend durch andere **Gemeinschaftsformen** ergänzt und ersetzt, in denen die verwandtschaftlichen Bindungen weniger klar sind.

2 Wenn Geschiedene wieder heiraten oder Homosexuelle eine **Lebenspartnerschaft** eingehen, geraten die an der klassischen Familienform orientierten Gesetze über die Rechte und Pflichten zur Betreuung von Kindern und Älteren in eine Schieflage.

3 Neue Formen des Zusammenlebens halten die Familie als Basis der Gesellschaft lebendig. Sie müssen aber auch seitens der **Sozial- und Familiengesetzgebung** gefördert werden, um beispielsweise die Herausforderungen der Berufswelt zu meistern.

Schon jetzt erscheint unsere soziale Welt vielfältig, mit Stief-, Patchwork- oder Ein-Eltern-Familien als Varianten des traditionellen Modells. Gesetzgeber und soziale Einrichtungen wie Krankenkassen und Versicherungen stellen sie jedoch vor erhebliche Probleme, denn diese orientieren sich noch weit gehend an der althergebrachten Form des Zusammenlebens. Um beim obigen Beispiel zu bleiben: Wenn eine der homosexuellen Mütter eines fernen Tages stirbt, wie sind dann die Pflege im Alter, Erbschaft und Unterstützung zwischen der Witwe und der nichtleiblichen Tochter geregelt?

Familie war bis ins 20. Jahrhundert unhinterfragt die mit der Heirat beschlossene Gemeinschaft zwischen Mann und Frau und den darin geborenen Kindern. Rechtlich wurde nur sie geschützt. Andere Lebensformen waren selten akzeptiert, mitunter gesetzlich verboten und sozial geächtet. Homosexualität etwa war hier zu Lande bis in die 1970er Jahre strafbar. Die Möglichkeit einer eingetragenen Lebenspartnerschaft als rechtliches Äquivalent zu der heterosexuellen Ehe wurde am 1. August 2001 in Deutschland rechtskräftig. Laut einem Mikrozensus von 2010 hatten immerhin 19 000 Paare dieses Angebot genutzt. Heute kaum noch vorstellbar ist, dass man noch vor wenigen Jahrzehnten Müttern unehelich Geborener die Befähigung absprach, ein Kind überhaupt erziehen zu können. Es wurde unter Vormundschaft gestellt und hatte überdies hinsichtlich Unterhalt und Erbschaft gegenüber ehelichen Geschwistern das Nachsehen. Heutzutage scheinen Ehe und Elternschaft geradezu entkoppelt voneinander: Während vor 20 Jahren nur jedes siebte Kind unehelich geboren wurde, gilt das heute für jedes dritte, in den neuen Bundesländern sogar für zwei von drei Kindern.

GROSSFAMILIE 1928: AKG-IMAGES; MUTTER MIT TÖCHTERN: ISTOCKPHOTO / COLOR OF TIME

Die Wirklichkeit von einst mutet heute nostalgisch an: Die Großfamilie ist anderen, unsichereren Formen wie der Ein-Eltern-Familie gewichen.

Diese Entwicklung wurzelt im Umfeld der 1968er-Bewegung. Damals argumentierten Sozialwissenschaftler und Intellektuelle, die ganz und gar auf den Vater als Patriarch zugeschnittene Ehe bringe keine aufgeklärten Bürger hervor, sondern unmündige Untertanen. Viel zu vieles und nicht nur Gutes spiele sich zudem unter dem Schutz des Privaten ab. Solche Fundamentalkritik förderte die Liberalisierung der Gesetze, was die Rechtslage alternativer Formen des Zusammenlebens verbesserte – und damit deren Verbreitung förderte. Als beispielsweise mit einer Scheidung nicht mehr nur das Risiko verbunden war, auf Grund eines Schuldspruchs das Sorgerecht für die gemeinsamen Kinder zu verlieren und erhebliche finanzielle Einbußen in Kauf nehmen zu müssen, konnte sich der Fokus der Partner von einer Zweck- und Solidargemeinschaft immer mehr auf die Qualität ihrer Beziehung verlagern. Heute bedeutet Scheidung nicht mehr nur Risiko, sondern auch eine Chance zu mehr Familienglück in einer anderen Konstellation. Die ökonomische Sicherheit der Ehe wurde gegen mehr Freiheiten, freilich auch gegen mehr Eigenverantwortung in der Lebensführung eingetauscht.

Jede zweite Ehe wird geschieden

Ob das ein guter oder ein schlechter Handel ist, darüber gehen die Meinungen auseinander. Aus einer christlich-konservativen Perspektive gilt die Entwicklung als Entwertung der klassischen Familie. Weil diese aber als Fundament des Gemeinwesens gesehen wird, als der Ort, an dem Solidarität, Verlässlichkeit, Gerechtigkeit, Anstand und Disziplin vermittelt werden, bedeute eine Erosion des Modells Ehe eine ernsthafte Gefahr für die Gesellschaft.

Zu einem Verfall von Moral und Anstand im prophezeiten Umfang kam es zwar nicht, doch die Institution Familie ist brüchiger geworden: Jede zweite Ehe wird inzwischen geschieden; laut dem Bundesministerium für Familie, Senioren, Frauen und Jugend wächst fast jedes zweite Kind zeitweise mit nur einem Elternteil auf, fast immer bei der Mutter. Damit erlebt ein Großteil der Heranwachsenden Familie als temporären Zustand. Sie lernen früh, dass die vermeintlich enge Solidargemeinschaft aufgelöst und mitunter durch eine neue ersetzt werden kann. Gemäß Michaela Schier vom Deutschen Jugendinstitut in München verliert etwa jedes fünfte Kind den Kontakt zum nun abwesenden Elternteil. Eine prägende Erfahrung, wie die Soziologin Sonja Schulz von der Universität Mannheim 2009 zeigte: Wer aus Scheidungsfamilien stammt, lässt sich mit größerer Wahrscheinlichkeit eines Tages selbst scheiden – und transportiert den Trend weiter.

Einer Studie des Staatsinstituts für Familienforschung an der Universität Bamberg zufolge lebt bereits jedes vierte Kind mit nur einem Elternteil oder in einer Stieffamilie (siehe Tabelle S. 70). Letztere ist dabei immer auch eine neue Familie, oder wie Soziologen es nennen: eine Fortsetzungsfamilie, die gleichzeitig für das Scheitern und Festhalten am traditionellen Modell steht. Häufig müssen sich Kinder nicht nur an Stiefvater oder -mutter gewöhnen, sondern auch an neue

Geschwister; man spricht von Patchworkfamilien. Auch der nun nicht mehr dazugehörende Elternteil geht vielleicht eine neue Partnerschaft mit oder ohne Kinder ein. Trennungskinder machen deshalb häufig Erfahrungen mit zwei Stieffamilien. Für den Gesetzgeber stellen solche Konstellationen eine Herausforderung dar. Wer gehört noch dazu, wer ist wem gegenüber verantwortlich? Wer soll Zugang zu staatlichen Leistungen wie Erziehungszeit oder -geld haben?

Doch nicht nur die Familienstrukturen, auch die alltägliche Lebensführung in Familien hat sich verändert. In der Nachkriegszeit war die Familie in der BRD von einer strikten Arbeitsteilung geprägt. Während die Männer erwerbstätig und für das Familieneinkommen verantwortlich waren, übernahmen Frauen die Erziehung der Kinder und die Pflege der älteren Angehörigen. Der amerikanische Ökonom Gary Becker vergleicht die arbeitsteilige Familie mit einer effizienten kleinen Fabrik. Doch rund läuft sie nur, wenn die Ehe stabil bleibt. Bei einer Trennung droht nicht oder nur gering berufstätigen Frauen die Armut.

Familienformen in Deutschland

Nach wie vor ist die klassische Kleinfamilie die häufigste Form des Zusammenlebens hier zu Lande. Doch der Anteil Alleinerziehender und der von Stieffamilien wächst.

Normalfamilie (biologische Eltern mit Kind), dabei gleichzeitig verheiratet	71,5 % 65,4 %
Alleinerziehende	14,8 %
einfache Stieffamilie (ein Elternteil mit Kind aus vorheriger Beziehung)	9,1 %
komplexe Stieffamilie beziehungsweise **Patchworkfamilie** (Paar mit Kindern aus mindestens zwei Beziehungen)	4,5 %
Regenbogenfamilie (gleichgeschlechtliche Partnerschaft mit Kind aus vorheriger, meist heterosexueller Beziehung oder aus aktueller Beziehung mit Hilfe von künstlicher Befruchtung, Samenspendern, Leihmüttern oder Adoption)	etwa 0,05 %

(Zahlenangaben in Prozent der Familienhaushalte mit Kindern unter 18 Jahren)

QUELLEN: STATISTISCHES BUNDESAMT: BEVÖLKERUNG UND ERWERBSTÄTIGKEIT – HAUSHALTE UND FAMILIEN. ERGEBNISSE DES MIKROZENSUS. IN: FACHSERIE 1 REIHE 3, WIESBADEN 2011 UND STEINBACH, A.: STIEFFAMILIEN IN DEUTSCHLAND. IN: ZEITSCHRIFT FÜR BEVÖLKERUNGSWISSENSCHAFT 33, S. 153–180, 2008

DPA / ROLAND WITSCHEL

Die Hippiebewegung der 1960er Jahre stellte bürgerliche Werte in Frage, praktizierte die freie, außereheliche Liebe und suchte alternative Formen des Zusammenlebens.

Ungewisse Zukunft der Kinderbetreuung

Mit den Scheidungsraten wuchs deshalb auch der Anteil erwerbstätiger Frauen. Übte 1970 nicht einmal jede zweite im Alter zwischen 25 und 54 Jahren einen Beruf aus, sind es heute acht von zehn Frauen. Indem die so gewonnene finanzielle Unabhängigkeit die mit einer möglichen Trennung verbundenen Risiken reduziert, fördert sie andererseits auch die Bereitschaft, über Alternativen zu einer unglücklichen Ehe beziehungsweise Lebenspartnerschaft nachzudenken.

In einer Studie im Auftrag der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) fragten meine Kollegen und ich nach Konsequenzen dieser Entwicklung. Dabei interessierten uns zwei Aspekte: Wie wird im Jahr 2030 die Betreuung von Kindern, wie die Versorgung älterer Menschen organisiert sein? Gibt es steuernde Maßnahmen, die wir jetzt schon ergreifen müssen, um Fehlentwicklungen vorzubeugen? Demografische Trends wie die Altersstruktur lassen sich für die nächsten 20 Jahre mit großer Genauigkeit vorhersagen, soziale Entwicklungen hingegen nur schwer. Wir haben daher verschiedene Szenarien entworfen, wobei wir insbesondere zwischen einer stabilen und einer instabilen wirtschaftlichen Entwicklung und zwischen einer schnellen und einer langsamen Adaption von neuen Technologien unterschieden. Deutschland ist in diesem Zusammenhang ein Land mit einer eher moderaten, aber tendenziell stabilen wirtschaftlichen Entwicklung und einer zögerlichen Aufnahme technologischer Innovationen.

Von den heute 45-Jährigen – den zukünftigen Alten – wurden hier zu Lande bereits zwei- bis dreimal so viele geschieden wie von den heute über 70-Jährigen (siehe Grafiken rechts). Der Trend dürfte sich fortsetzen, so dass Solidarität unter Verwandten in naher Zukunft nicht mehr zwingend vorausgesetzt werden kann. Davon wird in der Pflegeversicherung jedoch noch ausgegangen. Diese ist explizit als Ergänzung zur familialen Pflege und als Teilkaskoversicherung konzipiert. Tatsächlich wurden 2004 noch mehr als 80 Prozent der Pflegeempfänger zu Hause von Partnern oder Kindern versorgt. Meist erbringen Frauen die Betreuungsleistungen in der Familie, doch deren wachsende Erwerbsbeteiligung sowie die Erhöhung des gesetzlichen Rentenalters sorgen zusätzlich dafür, dass die Kleinfamilie als Hauptsäule der Pflege immer stärker wegbricht. Auch dass Frauen die Kinder erziehen und betreuen, ist nicht mehr in vollem Umfang gewährleistet. Bislang greift hier oft die Unterstützung durch die Großeltern. Laut der Züricher Soziologin Corinne Igel betreut etwa jede/r vierte von ihnen mindestens einmal pro Woche Enkelkinder. Aber die Erosion der klassischen Kleinfamilie stellt auch dieses Modell in Frage.

Bis 1969 war Homosexualität in Deutschland grundsätzlich strafbar. Seit 2001 besteht die Möglichkeit, eine Lebenspartnerschaft eintragen zu lassen und damit einen rechtlichen Status zu erhalten, der einer konventionellen Ehe weit gehend gleichgestellt ist. Das ermöglicht Männern auch, ein Kind zu adoptieren.

DPA / BARBARA MUNKER

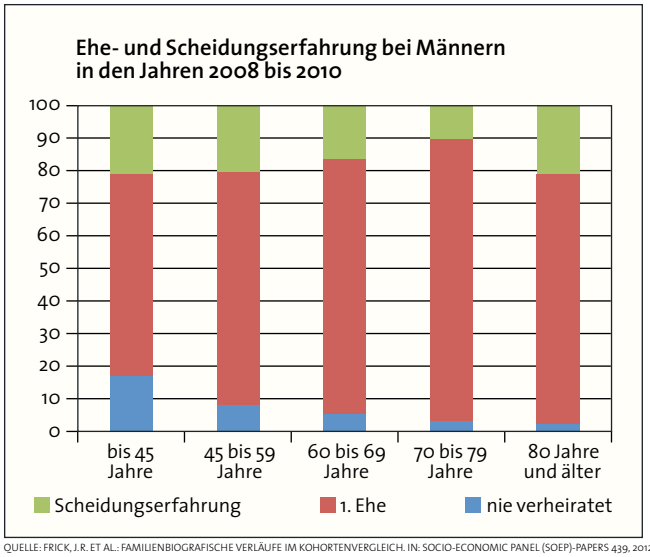
Diese Probleme sind inzwischen bekannt. Bislang verfolgen Sozial- und Familienpolitiker zwei Lösungsansätze dazu. Erstens lagern professionelle Angebote wie Kindertagesstätten und ambulante Pflege die Betreuung von Kindern oder Alten ganz oder teilweise aus der Familie aus. Diesen Weg der Entlastung von Angehörigen gehen vor allem Dänemark und Schweden schon seit Jahrzehnten. Er ist allerdings so kostspielig, dass Schwedens kommunale Verwaltungen den Zugang zu solchen Angeboten seit ein paar Jahren auf Personen einschränkt, die einen hohen Pflegebedarf haben oder sich nicht auf ein familiäres Netzwerk stützen können. Mit anderen Worten: Die Angehörigen werden wieder in die Pflicht genommen, die Betreuung wird »refamiliarisiert«.

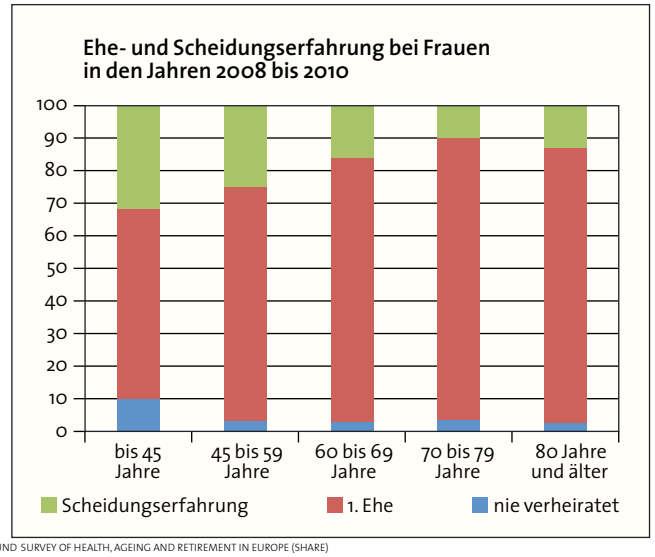
Der zweite Lösungsansatz sieht vor, Familien so zu unterstützen, dass sich ein Mitglied den Betreuungsaufgaben widmen kann. So erlauben der Bezug von Elterngeld und eine Arbeitsplatzgarantie, für den Nachwuchs eine Auszeit vom Beruf zu nehmen. Deutlich schlechter sind Arbeitnehmer gestellt, die sich vorübergehend freistellen lassen, um beispielsweise behinderte oder demenzkranke Angehörige zu versorgen: Die Zeit ist auf ein halbes Jahr begrenzt, das Pflegegeld beträgt maximal 700, das Elterngeld hingegen maximal 1800 Euro. Die Unterstützung des Staats für junge Familien ist also umfassender als die für pflegebedürftige ältere Menschen und ihre Angehörigen. Hier besteht offenkundig Handlungsbedarf, denn der Anteil der Familien mit Kindern schrumpft, während immer mehr Personen ein hohes Alter erreichen und somit der Anteil Pflegebedürftiger an der Bevölkerung wächst.

Beide Lösungsansätze richten sich überdies vorwiegend an die klassische Kleinfamilie, die entlastet oder unterstützt werden soll. Denn die enge gesetzliche Definition von Familie fokussiert die möglichen Leistungsempfänger vor allem auf nahe Angehörige der zu Betreuenden. Versorgen beispielsweise die Großeltern ihre Enkel, weil weder Vater noch Mutter eine Auszeit nehmen wollen oder können, verfällt der Anspruch auf Elterngeld, die »Dienstleistung« erfolgt unentgeltlich. Gelder aus der Pflegeversicherung dürfen zwar flexibel verwendet werden und stünden auch einem Freund des Bedürftigen zur Verfügung. Doch die geringe Honorierung und die zeitliche Begrenzung animieren kaum dazu, eine Erwerbstätigkeit ganz oder teilweise aufzugeben.

In unserer Studie zur Zukunft der Familie bis 2030 konstatieren wir dementsprechend eine wachsende Kluft zwischen der Sozial- und Familienpolitik einerseits und den Familienbiografien und individuellen Lebensarrangements andererseits. Während der Gesetzgeber nächste Angehörige in die Pflicht nimmt, wenn es um die Kinder- oder Altenbetreuung

Seit eine Scheidung gesellschaftlich akzeptiert ist, wächst die Bereitschaft, die Qualität einer Ehe zu hinterfragen und gegebenenfalls neue Partner zu suchen.





QUELLE: FRICK, J.R. ET AL.: FAMILIENBIOGRAFISCHE VERLÄUFE IM KOHORTENVERGLEICH. IN: SOCIO-ECONOMIC PANEL (SOEP)-PAPERS 439, 2012 UND SURVEY OF HEALTH, AGEING AND RETIREMENT IN EUROPE (SHARE)

Das Verschwinden der Großfamilie und die aktuelle Erosion der Kleinfamilie reißen Löcher in das soziale Netz. Mehrgenerationenwohnprojekte wie das »Ökodorf Sieben Linden« in Sachsen-Anhalt könnten eine Antwort darauf sein. Die Bereitschaft zur Solidarität, auch zur Betreuung von Kindern und Senioren, wird von allen erwartet (ganz rechts: eine gemeinsam gefeierte Hochzeit).

ÖKODORF SIEBEN LINDEN

geht, bedeutet enge Verwandtschaft längst nicht mehr automatisch emotionale Nähe und Solidarität zwischen diesen Menschen. Andererseits erhalten viele Personen, die umfassende Betreuungsaufgaben übernehmen, keine sozialstaatlichen Leistungen. Das betrifft insbesondere Stieffamilien, deren Mitglieder aus mehreren Fortsetzungsfamilien stammen, sowie Regenbogenfamilien, in denen die Erziehungsrechte oft nur bei einem Elternteil liegen. Dass Freundschaften heutzutage länger halten können als Familienbande, nimmt der Gesetzgeber kaum zur Kenntnis. In der Konsequenz wird also ein Familienmodell gegenüber anderen bevorzugt und damit die Wahlfreiheit zwischen verschiedenen Arrangements eingeschränkt. Zudem bleiben erhebliche Solidaritäts- und Unterstützungspotenziale in der Gesellschaft mangels Förderung schlicht ungenutzt.

Mit Blick auf die Zukunft gilt es, den Fokus auf die Familie als alleinige Solidargemeinschaft zu hinterfragen. Insbesondere Kleinfamilien haben nur eingeschränkte Möglichkeiten, um den Anforderungen der heutigen Arbeits- und Familienwelt gerecht zu werden. Kinder großzuziehen und womöglich gleichzeitig einen Elternteil zu pflegen, dürfte die meisten überfordern, schränkt oft die Erwerbstätigkeit ein – und belastet zusätzlich das Familienleben.

Gemeinsamkeit macht flexibel

Ein viel versprechender Lösungsansatz besteht darin, die Solidargemeinschaft in einer größeren Gruppe zu organisieren. Ein Zusammenschluss von mehreren Familien sowie von jüngeren und älteren Menschen verringert jeweils den Betreuungsaufwand und gibt gleichzeitig die Möglichkeit, auf berufliche Anforderungen flexibler zu reagieren, etwa kurzfristig angesetzte Dienstreisen oder Meetings durch Betreuungsleistung aus dem direkten Umfeld aufzufangen.

Vor allem in den skandinavischen Ländern, den Niederlanden und den USA erleben solche generationen- und familienübergreifenden Wohnformen wieder eine Renaissance. Beim so genannten »Cohousing« etwa schließen sich bis zu 40 Familien zusammen, die Wert auf Gemeinschaft und wechselseitige Unterstützung legen, ohne ihre Privatsphäre aufzugeben. Sie bewohnen benachbarte Häuser, vielleicht sogar eine neu gegründete Siedlung am Stadtrand. Dank der »kritischen Masse« ist beispielsweise eine selbst organisierte Einrichtung zur Kinderbetreuung machbar. Erst langsam zeigt sich ein Trend zu gemeinschaftlichen Wohnformen auch in Deutschland, wo laut dem »Nationalatlas« des Leibniz-Instituts für Länderkunde 2011 etwa 500 Projekte liefen: von den »Kleehäusern« – zwei Mehrfamilienhäuser mit 24 Mietparteien in Freiburg – bis hin zur Siedlungsgenossenschaft »Ökodorf Sieben Linden« bei Beetzendorf in Sachsen-Anhalt mit derzeit 120 Bewohnern (siehe Bilder oben).

Dergleichen weist den Weg in die Zukunft, denn es bietet das, was Familien immer weniger leisten können: ein über den gesamten Lebenslauf bestehendes und belastbares Unterstützungsnetzwerk. Besonders bedeutsam ist auch, dass Alleinstehende integriert werden können. Unterstützungsnetzwerke setzen jedoch kein gemeinschaftliches Wohnen voraus – das zeigen die knapp 500 seit 2006 in Deutschland vom Bund geförderten »Mehrgenerationenhäuser«-Begegnungsstätten. Dort können Alt und Jung Erfahrungen austauschen und sich bei Alltagsproblemen gegenseitig helfen.

Auch wenn solche Lösungen deutlich günstiger als professionelle Arrangements wie Kitas oder Altenbetreuungseinrichtungen sind, gratis sind sie nicht. Unterstützungsnetzwerke benötigen eine Infrastruktur, also Räumlichkeiten sowie technische Lösungen für Organisation und Pflege des Netzwerks. Zudem ist eine regelmäßige professionelle Beratung sinnvoll.

Freilich vermögen Personen ohne entsprechende Ausbildung anspruchsvolle Betreuungsaufgaben nur bis zu gewissen Grenzen auszuüben. Senioren mit fortgeschrittener Demenz, Personen mit schwerster Behinderung oder Kinder mit ausgeprägt aggressivem Verhalten zu versorgen, überschreitet diesen Rahmen.

Eine weitere Möglichkeit, die Belastungen zu schultern, die sich im Zusammenleben ergeben können, bieten neue Technologien. Die kontinuierliche Überwachung medizinischer Parameter wie Blutdruck oder Pulsschlag bei älteren Menschen gibt ihnen Sicherheit und entlastet Angehörige – gegebenenfalls alarmiert das Monitoringsystem einen Arzt oder den Pflegeservice. Kritisch sehen manche die Bestre-

ÖKODORF SIEBEN LINDEN / NICOLETTA GEIERSBACH

bungen, Roboter für die Reinigung von Räumen, für die Nahrungszubereitung, ja sogar als Unterstützung beim Aufstehen, Gehen und Waschen der Patienten einzusetzen. Ein leistungsfähiger Pflegeroboter schlägt heute noch mit mehreren zehntausend Euro zu Buche, doch dürften sich die Kosten mit der weiteren technischen Entwicklung deutlich verringern. Besteht dann nicht aber die Gefahr, dass Maschinen den Menschen ersetzen und ihren Arbeitsplatz gefährden? Diese Angst ist unbegründet. Denn zum einem sind Pflegekräfte heute auch mit anderen Aufgaben wie dem Führen von Pflegeprotokollen beschäftigt, was die Zeit begrenzt, die sie Patienten widmen können. Zum anderen gibt es bereits ohnehin zu wenige ausgebildete Kräfte. Daher ist es geradezu wünschenswert, mit Hilfe von neuen Technologien Arbeitsabläufe effizienter zu gestalten und das Personal von Routinen zu entlasten. Das kommt aber den Patienten zugute, denn es bleibt mehr Raum für Gespräche und andere Formen der Zwischenmenschlichkeit.

Welche Familien- und Solidaritätsformen sich in Zukunft etablieren können, hängt letztlich von den gesetzlichen Rahmenbedingungen ab, die immer weniger der gelebten Realität entsprechen. Die Frage »Wer gehört zur Familie?« lässt sich oft nicht mehr ohne Weiteres beantworten. Daher sollten die nach klassischem Verständnis direkten Angehörigen sehr viel weniger in die Pflicht genommen werden – sofern es sie überhaupt gibt. Zudem gilt es, den Zugang zu Sozialleistungen individueller und unabhängiger von einem gesetzlich definierten Familienmodell zu gewähren. Das bedeutet auch, dass die Betroffenen das Recht haben müssen, die obige Frage selbst zu beantworten. Beantragen leibliche Eltern keine Auszeit, sollten sie ihren Anspruch an Dritte wie Großeltern oder Vertraute weitergeben dürfen, die sich dann um die Kinder kümmern. All diese Maßnahmen helfen mit, soziale Sicherheit und Lebensarrangement voneinander zu entkoppeln. Gleichzeitig entsteht ein Freiraum, in dem sich verschiedenste Familien- und Lebensformen zum Wohle aller entwickeln können. Der Preis, den wir dafür zahlen: mehr Eigenverantwortung. ~

DER AUTOR

Klaus Haberkern promovierte 2008 in Soziologie. Er ist Oberassistent am Soziologischen Institut der Universität Zürich und forscht zu den Themen Familie und Pflege im internationalen Vergleich.

QUELLEN

Beier, L. et al.: Familyplatform. Existential Field 1: Family Structures & Family Forms in the European Union – An Overview of Major Trends and Developments. Working Report, 2010. Zu beziehen unter: www.familyplatform.eu/en/doc/96/EF1_Family_Structures%26Family_Forms.pdf

Haberkern, K. et al.: The Role of the Elderly as Providers and Recipients of Care. In: OECD 2012: The Future of Families to 2030. OECD Publishing, Paris 2012. DOI: 10.1787/9789264168367-6-en

Igel, C.: Großeltern in Europa. Generationensolidarität im Wohlfahrtsstaat. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, 2. Auflage 2011

Schulz, S.: Intergenerationale Scheidungstransmission und Aufwachsen in Stieffamilien. Gibt es den Transmissionseffekt auch bei Stiefkindern? In: Zeitschrift für Familienforschung 1/2009, S. 5–29

WEBLINK

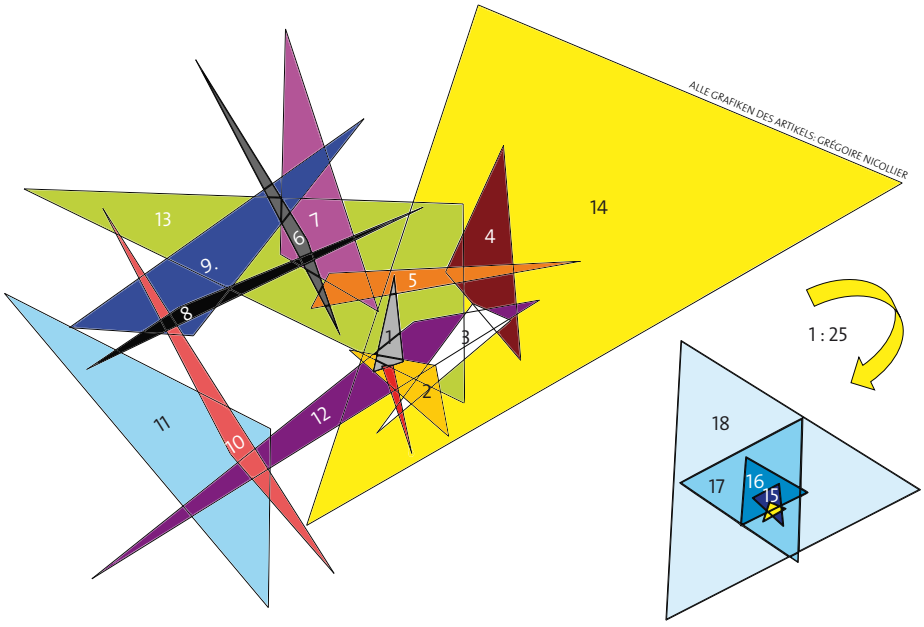
Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1159810**

GEOMETRIE UND CHAOSTHEORIE

Dreiecksbeziehungen

Aus einer schlichten Konstruktionsvorschrift wird ein chaotisches dynamisches System mit den überraschendsten Eigenschaften.

VON GRÉGOIRE NICOLLIER



Nach 14 Schritten des Spiegelungsvorgangs ist das kleine rote Dreieck endlich spitzwinklig (gelbes Dreieck) und reist zu seiner gleichseitigen Grenzform weiter. Wie verläuft sein Weg?

Eigentlich ist ein Dreieck nichts weiter als eine Menge von drei Punkten in der Ebene – seinen Eckpunkten. Aber die klassische Geometrie kennt eine Fülle von Objekten, die man aus diesen drei Punkten konstruieren kann, sowie von Beziehungen dieser Objekte untereinander. Beispiele sind die speziellen Punkte aus der Schulgeometrie, in denen sich bemerkenswerterweise jeweils drei gleichartige Geraden schneiden: die Mittelsenkrechten, die Winkelhalbierenden, die Höhen und die Seitenhalbierenden.

Entsprechend viele Möglichkeiten gibt es, aus einem Dreieck ein anderes zu machen. Man kann zum Beispiel als Eckpunkte des neuen Dreiecks die Mittelpunkte der Seiten des alten nehmen. Oder die »Fußpunkte« der Winkelhalbierenden – das sind die Punkte, an denen eine Winkelhalbierende die gegenüberliegende Seite trifft. Oder die Fußpunkte der Höhen, also der Senkrechten von einem Eckpunkt auf die gegenüberliegende Seite oder deren Verlängerung.

Jede dieser Vorschriften, aus einem Dreieck ein neues zu konstruieren, ist eine Abbildung (»Funktion«) im mathematischen Sinn, und zwar von der Menge aller Dreiecke in dieselbe Menge. Auf das neue Dreieck kann man dieselbe Vorschrift wieder anwenden, auf das so entstandene Dreieck noch einmal, und so weiter – im Prinzip unendlich oft; man nennt das »die Abbildung iterieren«. Und schon gerät die biedere Zirkel-und-Lineal-Konstruktionsvorschrift in Verbindung mit einem sehr modernen Teilgebiet der Mathematik. Denn iterierte Abbildungen sind ein zentrales Thema der Theorie dynamischer Systeme, besser bekannt unter dem etwas zu eng gefassten Namen »Chaostheorie« (siehe Spektrum der Wissenschaft Spezial 1/2010, »Zufall und Chaos«).

Über die Mathematik hinaus hat diese Theorie wegen ihrer philosophischen Implikationen Aufsehen erregt. Sie weist nämlich nach, dass zwei sehr gegensätzliche Eigenschaften miteinander vereinbar sind: Determinismus und Unvorhersagbarkeit. Selbst wer den Anfangszustand eines Systems – zum Beispiel das erste Dreieck der Iterationsfolge – beliebig genau kennt, ist außer Stande, irgendwelche brauchbaren Aussagen über das Verhalten der »späten« Folgenglieder zu machen.

Natürlich suchen die Mathematiker der generellen Unvorhersagbarkeit zum Trotz nach Struktur im deterministischen Chaos – und werden tatsächlich auch fündig. Insbesondere habe ich für ein dynamisches System, das durch eine Dreiecksabbildung definiert wird, nicht nur chaotisches Verhalten gefunden, sondern auch eine Einteilung der Menge aller möglichen Systemzustände in »ordentliche« und »anarchistische«. Dieses System möchte ich Ihnen im Folgenden vorstellen.

Es kommt nur auf die Form an

Zuvor noch ein paar Bemerkungen über iterierte Dreiecksabbildungen im Allgemeinen. Für deren Studium erweist es sich als zweckmäßig, auf einige Eigenschaften der Dreiecke keine Rücksicht zu nehmen. So interessiert man sich nicht dafür, wo in der Ebene sie liegen und wie sie orientiert sind. Man hat also die Freiheit, sie nach Belieben zu verschieben und zu drehen oder, was auf dasselbe hinausläuft, den eigenen Betrachterstandpunkt in der Ebene entsprechend zu verändern: Es bleibt trotzdem »eigentlich« dasselbe Dreieck. Zudem soll es nicht darauf ankommen, ob

man das Dreieck aus der Nähe oder aus der Ferne anschaut; die absolute Größe spielt also keine Rolle. Im Endeffekt betrachten wir zwei Dreiecke schon dann als »gleich«, wenn sie die gleiche Form haben, das heißt durch Drehung, Spiegelung, Verschiebung und Verkleinerung oder Vergrößerung miteinander zur Deckung gebracht werden können. Für diese Art der Gleichheit (»Ähnlichkeit«) genügt es, wenn die Dreiecke die gleichen Winkel haben.

Diese Betrachtungsweise hilft, die Eigenschaften einiger Iterationsabbildungen besser herauszuarbeiten. Nimmt man als Eckpunkte des neuen Dreiecks die Seitenmittelpunkte des alten, so ist das neue (das »Seitenmittendreieck«) eine Kopie des Mutterdreiecks, mit dem Faktor 1/2 verkleinert und um 180 Grad gedreht. Die Iterationsfolge konvergiert gegen einen Punkt: den gemeinsamen Schwerpunkt aller Dreiecke. Wenn man aber ähnliche Dreiecke als gleich ansieht, also nur die Winkel betrachtet, tut die Abbildung gar nichts. Sie bildet jedes Dreieck auf sich selbst ab.

Interessanter ist es, die Fußpunkte der Winkelhalbierenden als die neuen Eckpunkte zu nehmen. Auch hier zieht sich die Folge der echten Dreiecke auf einen Punkt zusammen (den man diesmal nicht zu berechnen weiß); wenn man aber wieder die absolute Größe und die Orientierung ausblendet, ergibt sich, dass sie gegen eine gleichseitige Form streben. Das ist alles andere als offensichtlich; erst 2006 gelang Dan Ismailescu und Jacqueline Jacobs an der Hofstra University in Hempstead (New York) der Beweis.

Diese Iterationsabbildung ebnet in der Tendenz Unterschiede zwischen Dreiecken ein: Wendet man sie auf zwei ungleiche Dreiecke an, so unterscheiden sich deren Bilder schon weniger als die Originale, die Bilder der zweiten Iteration noch weniger und so weiter, bis alles in der vorhersagbaren Einheitsform des gleichseitigen Dreiecks endet. Das ist das genaue Gegenteil von chaotischem Verhalten.

Damit das Chaos eine Chance hat auszubrechen, muss die Iterationsabbildung vorhandene Unterschiede verschärfen – zumindest manchmal. Das trifft zum Beispiel auf die Vorschrift zu, welche die Fußpunkte der Höhen zu den Eckpunkten des neuen Dreiecks erklärt. Sie verdoppelt vorhandene Differenzen – im Wesentlichen.

Natürlich kann die Abbildung nicht einfach alle Winkel verdoppeln; denn dann hätte das Höhendreieck die doppelte Winkelsumme des Ursprungsdreiecks, aber beide Winkelsummen müssen gleich 180 Grad sein. Die korrekte Aussage ist: Ein Winkel α des Ursprungsdreiecks findet sich im Höhendreieck als 2α, $180°-2\alpha$ oder $2\alpha-180°$ wieder. Nehmen wir zwei geringfügig verschiedene Ursprungsdreiecke mit den Winkeln $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$ und $\alpha_2, \beta_2, \gamma_2$. Dann wird der Unterschied zwischen α_1 und α_2 immer dann verdoppelt, wenn sowohl α_1 als auch α_2 nach derselben unter den drei obigen Vorschriften transformiert werden – also meistens. Entsprechendes gilt für die anderen Winkel.

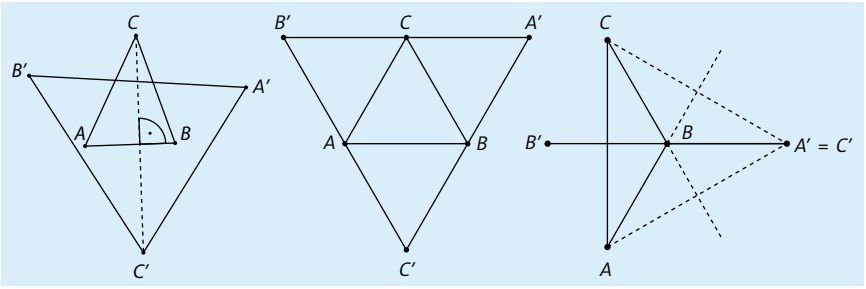
Dass daraus deterministisches Chaos entsteht, will allerdings noch eigens bewiesen werden. Ein Kennzeichen von Chaos ist die empfindliche Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen. Auf unser System bezogen besagt das, dass aus zwei Dreiecken, die sich beliebig wenig unterscheiden, völlig verschiedene Folgen von Höhendreiecken hervorgehen können. Das folgt unmittelbar aus der oben beschriebenen Verdopplungseigenschaft.

Ein anderes Kennzeichen ist die Ergodizität oder auch Mischungseigenschaft: Die Dreiecke der Folge kommen im Prinzip jeder denkbaren Form beliebig nahe. Das haben 1990 – nach Vorarbeiten anderer Wissenschaftler – Peter D. Lax, Abelpreisträger von 2005 (Spektrum der Wissenschaft 6/2005, S. 21), und Peter Ungar am Courant Institute in New York nachgewiesen.

Man kann sich den abstrakten Raum aller denkbaren Systemzustände (in unserem Fall Dreiecke) wie einen großen Kochtopf vorstellen. Das dynamische System, das aus jedem Dreieck sein Höhendreieck macht, wirkt dann wie ein gigantischer Rührlöffel, der den Topfinhalt perfekt durchmischt. Auf die Dauer kommt jedes Partikel der Brühe überall hin – fast jedes, um genau zu sein. Wie bei dynamischen Systemen üblich, gibt es Ausnahmepunkte, die der Durchmischung nicht unterliegen. Aber die Menge dieser Punkte ist vom Maß null, das heißt, man findet sie praktisch nicht durch Zufall, und sie spielen für das Gesamtbild keine Rolle.

Spiegelungsdreiecke

In diesem Artikel soll es nun um eine weitere Dreiecksfolge gehen. Und zwar spiegeln wir zu einem gegebenen Dreieck *ABC* jeden Eckpunkt an der ihm gegenüberliegenden Seite beziehungsweise deren Verlängerung. Wir gehen also von einem Eckpunkt nicht nur zu dessen Höhenfußpunkt, sondern noch einmal denselben Weg darüber hinaus.



So konstruiert man aus einem Mutterdreieck *ABC* sein Spiegelungsdreieck *A′B′C′* (links). Bei einem gleichseitigen Mutterdreieck ist die Tochter wieder gleichseitig (Mitte), bei einem Dreieck mit den Winkeln 30, 30 und 120 Grad ist sie zum geraden Strich entartet (rechts).

Das ergibt die Ecken des neuen Dreiecks, des »Spiegelungsdreiecks« *A'B'C'* (Bild S. 75, links).

Das zugehörige dynamische System ist in der Tat chaotisch. (Wieder sehen wir Dreiecke mit gleichen Winkeln als gleich an.) Seine Struktur ist noch weitaus reichhaltiger als die des Systems mit den Höhendreiecken. Im letzten Jahr ist es mir gelungen, diese Struktur vollständig aufzuklären.

Zunächst einige Beobachtungen: Das Spiegelungsdreieck eines gleichseitigen Dreiecks ist wieder gleichseitig (Bild S. 75, Mitte). Ein Dreieck mit Winkeln von 30, 30 und 120 Grad wird unter der Iterationsabbildung zum entarteten Dreieck, dessen Seiten alle auf derselben Geraden liegen (Bild S. 75, rechts). Ein einmal entartetes Dreieck bleibt unter allen weiteren Iterationen entartet.

Einzelne Iterationsfolgen sehen schon recht chaotisch aus (Bilder S. 74 und unten). Wenn jedoch kein Winkel des Anfangsdreiecks 90 Grad übersteigt, sieht es ganz so aus, als würden die aufeinander folgenden Spiegelungsdreiecke nicht nur immer größer, sonder strebten auch einer gleichseitigen Grenzform zu (Bild S. 74).

Für die weitere Erforschung wäre es hilfreich, wenn man die Winkel des Spiegelungsdreiecks aus denen des Mutterdreiecks ausrechnen könnte. Das ist weitaus schwieriger als beim Höhendreieck. Um den Rechenaufwand in erträglichen Grenzen zu halten, verwendet man an Stelle der Winkel α, β und γ deren Sinuswerte. Darüber hinaus erweist es sich als zweckmäßig, die Form eines Dreiecks durch die beiden Größen

$$s = \sin^2\alpha + \sin^2\beta + \sin^2\gamma \text{ und}$$
$$p = \sin^2\alpha \ \sin^2\beta \ \sin^2\gamma$$

(Summe und Produkt der Quadrate der Sinuswerte) auszudrücken. Aus s und p lassen sich die Dreieckswinkel zurückgewinnen. Zwei Größen genügen, denn wenn man zwei Winkel hat, ist auch der dritte bestimmt, weil die Winkelsumme im Dreieck stets 180 Grad ist. Ein ganzes Teilgebiet der Mathematik, die Trigonometrie, stellt für den Umgang mit den Winkelfunktionen Sinus und Cosinus zahlreiche Formeln bereit. Einige trigonometrische Akrobatikeinlagen führen von s und p zu den entsprechenden Größen des Spiegelungsdreiecks:

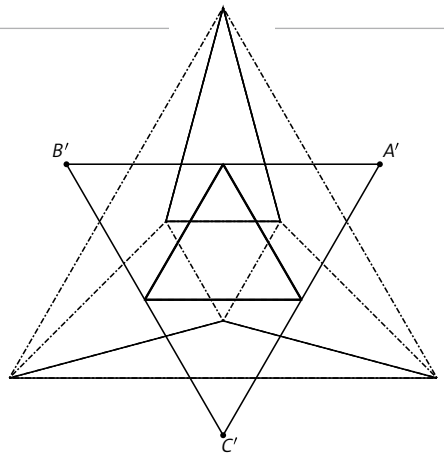
$$S = \frac{(s+16p)(4s-5)^2}{4s+1+64p(4s-7)}$$

und

$$P = \frac{p(4s-5)^6}{(4s+1+64p(4s-7))^2}$$

Der niederländische Geometer, Statistiker und Jurist Jan van IJzeren (1914–1998) hat diese Formeln 1984 erstmals veröffentlicht. Seine auf Niederländisch verfasste Arbeit geriet in Vergessenheit – zum Glück für mich, sonst wäre vielleicht ein anderer mir zuvorgekommen. Erst durch das Internet kam sein Werk wieder ans Tageslicht. Van IJzerens verzwickte Formeln lassen sich zähmen und so weit ausnutzen, dass sie schlussendlich alle Geheimnisse des Problems preisgeben.

Daraus, dass gewisse trigonometrische Gleichungen nicht nur eine Lösung haben, erschließt man, dass die Iterationsabbildung nicht umkehrbar ist. Zu einem Dreieck (der »Mutter«) gibt es zwar nur ein Spiegelungsdreieck (die »Tochter«); aber eine Tochter hat fünf bis sieben Mütter, wenn sie nicht gerade zum Strich entartet ist, und genau sieben, wenn sie gleichseitig oder fast gleichseitig ist. Insbesondere kann ein gleichseitiges Dreieck entweder von einem gleichseitigen Dreieck oder drei gleichschenkligen Dreiecken mit den Winkeln 75, 75 und 30 Grad und drei gleichschenkligen Dreiecken mit den Winkeln 15, 15 und 150 Grad abstammen (Bild oben; eigentlich sollten diese jeweils drei gleichförmigen Dreiecke als ein und dasselbe gelten, aber für die Mütterzählung erweist es sich als zweckmäßig, sie als echte Dreiecke und damit als verschieden zu betrachten).

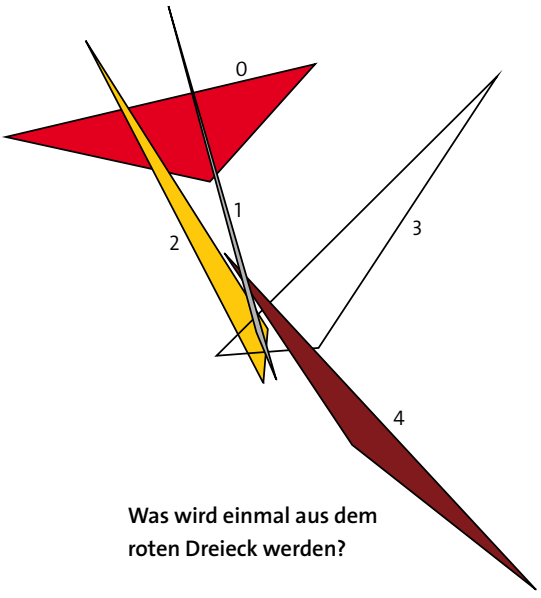


Ein gleichseitiges Spiegelungsdreieck *A'B'C'* mit seinen sieben Mutterdreiecken.

Der Eindruck aus den ersten Beobachtungen bestätigt sich: Beginnt man mit einem spitzwinkligen oder rechtwinkligen Dreieck (kein Winkel über 90 Grad), so nähern sich die sukzessiven Spiegelungsdreiecke tatsächlich der gleichseitigen Form an. Eine andere Grenzform ist daher nur möglich, wenn das Anfangsdreieck stumpfwinklig ist.

Ein entartetes Dreieck entsteht genau dann aus einem nicht entarteten, wenn dieses den s-Wert (die Summe der Quadrate der Sinuswerte seiner Winkel) $s = 5/4$ hat. Es gibt unendlich viele solche Dreiecksformen. Das Dreieck mit den Winkeln 30, 30 und 120 Grad ist das einzige gleichschenklige Dreieck mit dieser Eigenschaft.

Grenzen wir das Chaos noch mehr ein, indem wir nach weiteren Formen von Ordnung suchen. Das wären zum Beispiel Dreiecke, die unter der Abbildung in ihrer Form unverändert bleiben (»Fixpunkte« der Iteration) oder eine kleine Anzahl von Zuständen immer wieder durchlaufen.



Was wird einmal aus dem roten Dreieck werden?

Neben dem gleichseitigen Dreieck und den entarteten finden sich nur zwei Fixpunkte der Iteration. Das erste dieser Dreiecke hat ungefähr die Winkel 17,027, 32,132 und 130,84 Grad (diese Zahlen stehen wahrscheinlich nicht in einem rationalen Verhältnis zu 180 Grad) und die Werte

$$s = \frac{6-\sqrt{5}}{4} \quad \text{und} \quad p = \frac{8\sqrt{5}-17}{64} .$$

Setzt man sie in van IJzerens Formeln ein, so ergibt sich $S = s$ und $P = p$. Das zweite ist das heptagonale Dreieck mit $s = 7/4$ und $p = 7/64$, dessen Winkel 1/7, 2/7 und 4/7 von 180 Grad betragen, also ungefähr 25,7, 51,4 und 102,9 Grad. Man erhält es, indem man von einem regelmäßigen Siebeneck den ersten, den zweiten und den vierten Eckpunkt nimmt.

Es gibt sieben Dreieckspaare, bei denen jeder Partner (bezüglich der Form) Spiegelungsdreieck des anderen ist, die Folge der Iterierten also die Periode 2 hat, sowie 32 Gruppen aus drei Dreiecken, die durch die Abbildung immer wieder durchlaufen werden. Zyklen von 4, 5, 6, ... Spiegelungsschritten existieren ebenfalls.

In unendlich vielen Fällen strebt die Folge der Spiegelungsdreiecke eines Mutterdreiecks weder gegen eine stabile Grenzform noch gegen einen Grenzzyklus wiederkehrender Gestalten, sondern irrt ziel- und endlos durch die weite Welt der stumpfwinkligen Dreiecke.

Gute Dreiecke kommen in den Himmel, böse überallhin

Um einen gewissen Überblick über das Chaos zu gewinnen, empfiehlt sich die Anfertigung einer Art Landkarte. Wir stellen jedes Dreieck durch einen Punkt dar, dessen Koordinaten seine beiden kleinsten Winkel α und β sind (Kasten auf der nächsten Seite).

Jedem Punkt auf dieser Landkarte (das heißt jedem Dreieck) ist genau ein Punkt zugeordnet, der dessen Spiegelungsdreieck entspricht. Stellen wir uns den Lebenslauf eines Dreiecks so vor, dass es von seiner Urform in sein Spiegelungsdreieck verwandelt wird, dieses dann wieder in sein Spiegelungsdreieck und so weiter bis ins Unendliche. Das Leben eines Dreiecks ist also durch seine Urform in alle Ewigkeit vorherbestimmt: Das System ist deterministisch. Aber es ist deterministisches Chaos, zumindest stellenweise.

Wenn für ein Dreieck die Gleichseitigkeit so etwas ist wie die ewige Seligkeit, dann darf sich ein spitzwinkliges Dreieck von Anfang an glücklich schätzen. Es bleibt nicht nur sein Leben lang spitzwinklig, es kommt auch der Seligkeit immer näher.

Die Dreiecke, die nicht das Glück hatten, spitzwinklig geboren zu werden, müssen deswegen noch nicht verzweifeln. Wer sich im grünen Bereich (Bild im Kasten S. 78) befindet, ist nach einer einzigen Iteration hellblau (spitzwinklig) und damit auf dem Pfad der Tu-

WISSEN, WAS WICHTIG IST – IMMER UND ÜBERALL!

Mit dem Digitalabo von **Spektrum der Wissenschaft**

Jahresabonnenten (Privatnutzer) können nicht nur die aktuelle Ausgabe direkt als PDF abrufen, sondern haben auch noch vollen Zugriff auf das komplette Onlineheftarchiv!

www.spektrum.de/digitalabo

gend. Dreiecke aus den dunkelblauen Bereichen sind nach einem Schritt im Grünen und damit nur unwesentlich weiter von der Seligkeit entfernt, solche aus den roten brauchen insgesamt drei Schritte (über Dunkelblau und Grün), bis sie spitzwinklig sind.

Außer der ewigen Seligkeit gibt es allerdings auch die ewige Verdammnis. Das ist der Zustand des zum Strich entarteten Dreiecks, der bei $\alpha = \beta = 0$ in der linken unteren Ecke des Bilds im Kasten zu finden ist. Einmal entartet, immer entartet: Der Zustand (0, 0) ist ein Fixpunkt der Iterationsabbildung, aus ihm gibt es kein Entkommen.

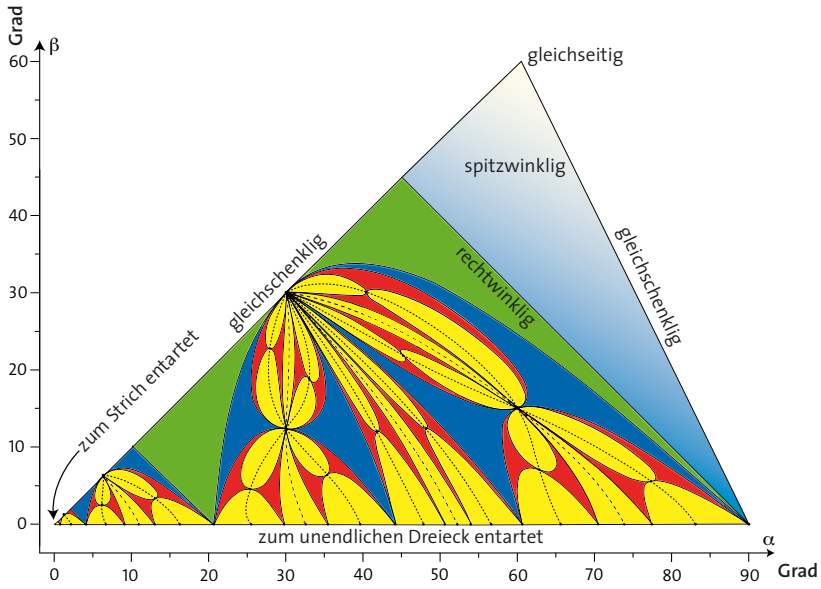
Das Schicksal ist gnädig

Anders als die Seligkeit, der man sich im Allgemeinen sehr allmählich nähert, schlägt die Verdammnis plötzlich zu. Wer auf die strichpunktierte Linie im Bild gerät, findet sich im nächsten Schritt in der Hölle wieder. Von einem Punkt auf einer gestrichelten Linie führt der Weg erst auf die strichpunktierte und dann schnurstracks ins Verderben; Punkte auf einer der punktierten Linien haben noch einen Iterationsschritt länger zu leben.

In einem gewissen Sinn ist das Schicksal allerdings gnädig. Ein hinreichend kleiner Fehltritt tut der Seligkeit keinen Abbruch, während ein noch so kurzer geschickter Rettungssprung einen vor der Verdammnis bewahrt. Genauer gesagt: Jeder »gute«, das heißt zur ewigen Seligkeit bestimmte Punkt hat um sich eine ganze Umgebung guter Punkte, und in jeder Umgebung eines »verdammten«, das heißt irgendwann in der Entartung endenden Punktes gibt es gute Punkte. Nirgends ist der Weg zur Seligkeit so einfach wie hier: Die Guten können einfach dem Schicksal seinen Lauf lassen, und alle anderen müssen ihr Leben nur ein bisschen gezielt ändern – ein beliebig kleines bisschen. Die Mathematiker drücken die Sache etwas prosaischer aus: Die Menge der Zustände, die zur Gleichseitigkeit konvergieren, ist offen und dicht.

Was ist mit den Dreiecken, die wir bislang weder auf den Inseln der Seligen noch auf den Wegen zur Verdamm-

Die Landkarte der Dreiecke



Die Gestalt eines Dreiecks ist durch seine beiden kleinsten Winkel bereits vollständig bestimmt; der dritte Winkel ergibt sich aus dem Satz über die Winkelsumme.

Bezeichnen wir den kleinsten Winkel eines Dreiecks mit α, den zweitkleinsten mit β, dann entspricht jeder Punkt in dem gefärbten Teilfeld der (α, β)-Ebene (Bild) einem Dreieck. Das gleichseitige Dreieck ist der Punkt an der Spitze. Alle spitzwinkligen Dreiecke befinden sich in dem hellblauen Feld rechts oben. Gleichschenklige und rechtwinklige Dreiecke sind auf den entsprechend bezeichneten Linien angesiedelt.

Der Punkt (0, 0) entspricht allen Dreiecken, die zum Strich entartet sind. Die zwei Winkel an den Enden des Strichs sind null. Der dritte beträgt 180 Grad und liegt an einem Punkt irgendwo auf dem Strich, auf dessen genaue Lage es nicht ankommt. An der Unterkante des gefärbten Felds ($\beta = 0, \alpha > 0$) liegen entartete Dreiecke einer anderen Art, von denen im Haupttext nicht die Rede ist: Zwei der drei Seiten sind parallel und treffen sich im Unendlichen mit dem Winkel $\beta = 0$. Die dritte Seite ist eine gewöhnliche (endlich lange) Strecke und bildet mit den Parallelen den Winkel α.

Aus der Konstruktion des Spiegelungsdreiecks ergibt sich eine Abbildung, die jeden Punkt des gefärbten Felds (jedes Dreieck) auf denjenigen Punkt abbildet, der dem zugehörigen Spiegelungsdreieck entspricht. Jedes spitzwinklige Dreieck wird wieder auf ein spitzwinkliges abgebildet. Wendet man die Abbildung auf den Bildpunkt eines solchen Dreiecks an, dann auf dessen Bildpunkt und so weiter (Iteration der Abbildung), so strebt die Folge dieser Dreiecke gegen das gleichseitige Dreieck.

Jedes grüne Dreieck, das heißt jeder Punkt in dem grünen Teilbereich, wird auf ein spitzwinkliges abgebildet, jedes dunkelblaue auf ein grünes und jedes rote auf ein dunkelblaues. Insbesondere sind alle roten Dreiecke nach drei Iterationsschritten spitzwinklig und damit auf dem Weg zur Gleichseitigkeit.

Alle Dreiecke auf der strichpunktierten Linie werden durch die Abbildung zu entarteten Dreiecken, geraten also in den Punkt (0, 0) und verbleiben dort unter allen weiteren Iterationen. Punkte auf den gestrichelten Linien entarten nach zwei, solche auf den gepunkteten Linien nach drei Iterationsschritten.

In meiner Arbeit ermittle ich auch auf der Landkarte zu jedem nichtentarteten Tochterdreieck den genauen Standort seiner fünf bis sieben Mütter. *G. N.*

nis finden (im Bild im Kasten gelb gefärbt)? Man kann die Analyse weitertreiben, also allen Punkten, die nach einem Schritt im Roten landen, eine neue Farbe geben, dann allen, die nach zwei Schritten im Roten landen, und so weiter. Entsprechend findet man Linien aus Punkten, die nach einem, zwei, drei ... Schritten auf eine punktierte Linie geraten. Wie bei Iterationsabbildungen üblich, werden die neu eingefärbten Bereiche und die Zusatzlinien immer zahlreicher und sind zu den bereits vorhandenen Bereichen irgendwie ähnlich – nicht im Sinn einer einfachen Vergrößerung oder Verkleinerung, sondern einer komplizierteren (stetigen) Deformation. Die Verteilung der Dreiecke weist eine fraktale, selbstähnliche Struktur auf: Gewisse Teile enthalten verkleinerte (mehr oder weniger verformte) Kopien ihrer selbst, die folglich auch verkleinerte Kopien ihrer selbst enthalten, und so weiter.

Die neu eingefärbten Bereiche und die neuen Linien zur Verdammnis überdecken die gelben Bereiche schließlich so vollständig, dass mit bloßem Auge nichts mehr davon zu sehen ist. Gleichwohl bleiben unendlich viele gelbe Punkte übrig. Das sind solche wie das heptagonale Dreieck, die weder gut noch verdammt sind. Ihre Lebenswege verlaufen früher oder später zyklisch, durchlaufen also nach einer gewissen Zeit immer wieder dieselbe Folge von Punkten; oder sie irren scheinbar regellos durch den verfügbaren Raum, alle guten und alle verdammten Punkte meidend.

Nennen wir alle Punkte, die weder gut noch verdammt sind, »böse«. Dann kann man beweisen: Es gibt einen bösen Punkt, der im Lauf seines Lebens jedem bösen und jedem verdammten Punkt unendlich oft beliebig nahe kommt. Es gibt sogar unendlich viele solche superbösen Punkte. Durch beliebig kleine Veränderung eines bösen Dreiecks kann man aus ihm ein gutes, ein verdammtes oder ein böses mit besonderen Eigenschaften (zum Beispiel zyklisch werdend mit wählbarer Periode) machen. Auf der Teilmenge der bösen und der verdammten Punkte ist das dynamische System mischend ebenso wie das oben genannte System mit den Höhendreiecken: Zu zwei gegebenen Dreiecken D_1 und D_2 ohne gleichseitige Grenzform findet sich in beliebig kleiner Entfernung von D_1 ein Dreieck, das auf seinem Lebensweg D_2 exakt trifft, also ein Vorfahr von D_2.

Symbolische Dynamik

Woher weiß man das alles? Durch viel Detailarbeit. Man muss von der Darstellung durch α und β zur gleichwertigen durch s und p (Summe und Produkt der Quadrate der Sinuswerte) übergehen und dann aus den oben genannten Formeln wesentliche Beweisschritte herausholen. Die Existenz von Zyklen jeder Periode folgt aus einem Fixpunktsatz, der von van IJzerens Landsmann Luitzen Egbertus Jan Brouwer (1881–1966) stammt.

Schließlich kann man in einem iterativen Verfahren jedem Punkt eine »Adresse« zuweisen: eine Folge von Ziffern, die nicht nur diesen Punkt lokalisiert, sondern auch über sein Schicksal Auskunft gibt. Damit ist die Dynamik des Systems in eine »symbolische Dynamik« übersetzt. In ihr geht es nicht mehr um die geometrischen Einzelheiten, sondern nur noch um die innere Struktur des Systems: Ein Dreieck wird zur Anschrift, der Wechsel zum Spiegelungsdreieck ist nur noch eine einfache Adressenänderung. Aus dieser Darstellung lassen sich viele Erkenntnisse gewinnen.

Als krönenden Abschluss stellen wir noch zwei offene Fragen vor, die mit unserem Problem zusammenhängen. Als Eckpunkte des Tochterdreiecks kann man die Punkte auf jeder Mutterdreiecksseite wählen, die auf halbem Weg zwischen der Seitenmitte und dem Höhenfußpunkt liegen. Es stellt sich heraus, dass das so entstehende Dreieck dieselben Winkel hat wie das Spiegelungsdreieck. In unserer auf Klassen ähnlicher Dreiecke eingeschränkten Sichtweise ist die neue Iterationsabbildung somit dieselbe wie zuvor. Die echten Dreiecke werden allerdings im Gegensatz zu den Spiegelungsdreiecken tendenziell kleiner; für spitzwinklige Dreiecke ist sogar die Tochter vollständig in der Mutter enthalten und der Gleichseitigkeit noch näher als sie. Also strebt zumindest für gute Dreiecke die Folge gegen einen Grenzpunkt. Die naheliegende Frage lautet: Wo liegt dieser Grenzpunkt? Und existiert er vielleicht auch für nicht gute Dreiecke?

Die zweite Frage taucht auf, wenn unser Problem in drei Dimensionen übertragen wird: Wie verhält sich die Folge der Spiegelungspyramiden einer Mutterpyramide mit dreieckiger Grundfläche, wenn die neuen Ecken durch Spiegelung der alten an der gegenüberliegenden Grund- oder Seitenfläche entstehen?

DER AUTOR

Der Bergführer **Grégoire Nicollier** unterrichtet Mathematik für Ingenieure an der zweisprachigen Fachhochschule Westschweiz in Sion (Sitten), mitten in den Walliser Alpen unweit des Matterhorns. 1984 schloss er sein Studium an der ETH Zürich mit einer Dissertation über homologische Algebra ab.

QUELLEN

Alexander, J. C.: The Symbolic Dynamics of the Sequence of Pedal Triangles. In: Mathematics Magazine 66, S. 147–158, 1993

Ismailescu, D., Jacobs, J.: On Sequences of Nested Triangles. In: Periodica Mathematica Hungarica 53, S. 169–184, 2006

van IJzeren, J.: Driehoeken met gegeven spiegelpuntsdriehoek. In: EUT Report 84-WSK-03, Technische Universität Eindhoven 1984, S. 356–373. Online unter http://alexandria.tue.nl/repository/books/256699.pdf

Lax, P. D.: The Ergodic Character of Sequences of Pedal Triangles. In: The American Mathematical Monthly 97, S. 377–381, 1990

Nicollier, G.: Reflection Triangles and Their Iterates. In: Forum Geometricorum 12, S. 83–129, 2012. Online unter http://forumgeom.fau.edu

Ungar, P.: Mixing Property of the Pedal Mapping. In: The American Mathematical Monthly 97, S. 898–900, 1990

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1159821**

Hunger und Gehirn

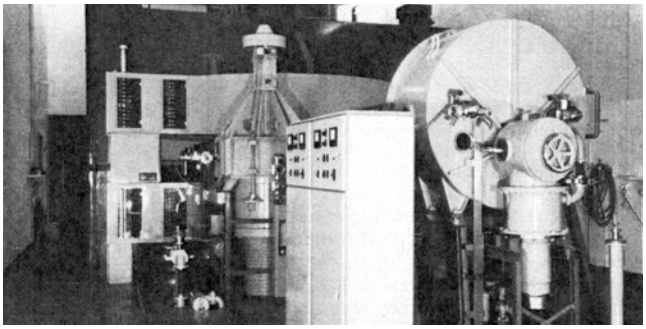
»Durch das Tierexperiment wurde bewiesen, daß von bestimmten Stellen des Gehirns Fettsucht erzeugt werden kann. Die Durchforschung dieser Hirnregion mittels elektrischer Reizungen oder punktförmiger elektrischer oder mechanischer Zerstörung von Hirnsubstanz zeigten, daß die Ausschaltung bestimmter kleiner Kerngruppen im Boden der 3. Hirnkammer mit Verlust des Sättigungsgefühls verbunden war, die Versuchstiere erkrankten und innerhalb 6 bis 8 Wochen ihr Körpergewicht verdoppelten. Seitlich von diesen Kerngebieten wurden Formationen entdeckt, die mit der Funktion eines ›Freß-Zentrums‹ verknüpft sind, so daß eine Zerstörung zu rapider Abmagerung führt.« Umschau 20, 1962, S. 642

Tempo 200 für die Schiene

»Heute arbeiten Techniker der Bundesbahn daran, eine Höchstgeschwindigkeit von 200 km/h in die Tat umzusetzen. Der vorhandene Oberbau läßt dies nach geringfügigen Verbesserungen zu. Anders ist es mit der Signaltechnik. Hier muß ein Signalsystem ausgearbeitet werden, das sicherstellt, daß dem Lokomotivführer rechtzeitig die Stellung der Signale mitgeteilt wird. Auch das Triebfahrzeug stellt eine Reihe neuer Aufgaben an die Technik. Ein Problem ist die Stromabnahme vom Fahrdraht bei 200 km/h.« Umschau 20, 1962, S. 647

Sternstunde der Kernphysik in Göttingen

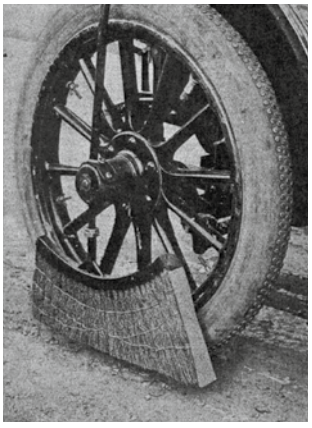
»... wurde am 12. Juli der Universität Göttingen ein Synchro-Zyklotron übergeben. Unter Einfluss eines hochfrequenten Wechselfeldes werden die in der Kammer eingeschlossenen geladenen Teilchen auf einer spiralförmigen Bahn beschleunigt. Nach rund 5000 Umläufen haben die Teilchen eine Geschwindigkeit von 50 000 km/sek erreicht. Mit diesen energiereichen Teilchen bombardiert man bestimmte Stoffe, um darin Kernreaktionen auszulösen.« Elektronik 10, 1962, S. 315



Forschung im strahlungssicheren Betongebäude: Der neue Göttinger Ionenbeschleuniger.

Schutz gegen Spritzschmutz

»Unzweifelhaft ist es höchst unangenehm für den Passanten, wenn ein rasch vorübersausendes Auto ihn mit Schmutz bespritzt, und es verdient daher gewiß Anerkennung, daß jüngst der französische Automobilclub durch ein Preisausschreiben die Aufmerksamkeit der Erfinder auf diesen Punkt gelenkt hat. Im ganzen haben sich mehr als 30 Firmen beteiligt, unter denen schließlich Dreur den ersten Preis erhielt. Es handelt sich um eine Platte, die vor dem Rad befestigt ist. Als Resultat dieses Wettbewerbs kam eine an die Deputiertenkammer gerichtete Eingabe zustande, die gesetzlichen Zwang zur Anbringung von Spritzschutzvorrichtungen beantragt.« Technische Monatshefte 10, 1912, S. 313–315



Der preisgekrönte Dreckschutz.

Feuer in der Grube

»Einstweilen glaubt man Wirtschaftlichkeit dadurch erreicht zu haben, daß man die zu Tage geförderten Kohlen durch Verbrennung in Elektrizität verwandelt oder sie direkt vergast. Einen Schritt weiter will Sir William Ramsay gehen, der kürzlich die Möglichkeit erörterte, die Kohle in der Grube zu vergasen. In einem amerikanischen Patent aus dem Jahr 1909 ist das Problem schon angeschnitten worden. Der Erfinder wollte Kohlenflöze dadurch ausbeuten, daß er sie anbohrte und entzündete.« Prometheus 1197, 1912, S. 16

Ein Zwergsaurier

»Seinem ungeheuren Vetter gegenüber (gemeint war der Allosaurus; die Red.) kann Podokesaurus holyokensis nur eine Größe von 18 cm aufweisen. Wenn auch den Laien die großen Saurier eher interessieren, so sind doch die kleinen, besser erhaltenen Tiere für die wissenschaftliche Bearbeitung wertvoller. Um so mehr ist es zu begrüßen, daß neuerdings von Prof. Fraß, Stuttgart, in der deutschen Trias bedeutende Funde solcher Kleinsaurier gemacht wurden.« Die Umschau in Wissenschaft und Technik 41, 1912, S. 872–873

AUS ZEITSCHRIFTEN DER FORSCHUNGSBIBLIOTHEK FÜR WISSENSCHAFTS- UND TECHNIKGESCHICHTE DES DEUTSCHEN MUSEUMS

Für alle Wissbegierigen zwischen 10 und 14 Jahren, die nicht nur das »Was«, sondern auch das »Wie« und »Warum« interessiert, gibt es jetzt ***Spektrum NEO***. In jeder Ausgabe wird ein großes Thema behandelt – im aktuellen Heft »Die Welt im Jahr 2050« und in der nächsten Ausgabe »Nano – Expedition ins Unsichtbare«

In Zusammenarbeit mit dem Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik in Kiel

facebook

Jetzt die Heftreihe oder einzelne Hefte bestellen:

www.spektrum-neo.de

Ökosysteme erforschen

Um den Gesetzen ökologischer Systeme auf die Schliche zu kommen, entwickeln Forscher ausgeklügelte Experimente. Oft müssen sie dabei jedoch auf verheerenden Eingriffen des Menschen aufbauen.

Von Robert M. Pringle

»Wie anziehend es ist, ein mit verschiedenen Pflanzen bedecktes Stückchen Land zu betrachten, mit singenden Vögeln in den Büschen, mit zahlreichen Insekten, die durch die Luft schwirren, mit Würmern, die über den feuchten Boden kriechen, und sich dabei zu überlegen, dass alle diese so kunstvoll gebauten, so sehr verschiedenen und doch in so verzwickter Weise voneinander abhängigen Geschöpfe durch Gesetze erzeugt worden sind, die noch rings um uns wirken.«

So beginnt Charles Darwin den letzten Absatz seines 1859 erschienenen Werks »Über die Entstehung der Arten«. Er war damals den ineinandergreifenden Regeln und Kräften der Evolution auf der Spur, die er im Wesentlichen erkannt hatte. Was allerdings ökologische Gesetzmäßigkeiten betrifft – also Beziehungen und Wechselwirkungen zwischen Organismen und ihrer lebenden und unbelebten Umwelt –, so haben die Forscher auch heute noch große Mühe, die jeweils wirkenden Einflüsse und Entwicklungsmuster zu verstehen. Selbst scheinbar simple Fragen entpuppen sich oft als reichlich kompliziert – etwa warum eine bestimmte Population gerade an jenem Ort vorkommt und an einem anderen ganz ähnlichen nicht oder weshalb von einer Eidechse in einem Waldgebiet pro Hektar rund 500 Exemplare leben und nicht 50 oder 5000. Verblüffend ist oft auch, wie stark sich Artenbestände mit der Zeit verändern können. Welche Faktoren jeweils in den Vordergrund treten, kann sogar von der Größe des betrachteten Ausschnitts eines Ökosystems abhängen.

Zur Umwelt eines Organismus gehören zum Beispiel: andere Vertreter der eigenen Art sowie Angehörige weiterer Spezies, deren Verteilung und Raumnutzung, zudem Faktoren wie Temperatur, Lichtmenge, Wasser oder auch verschiedenste chemische Stoffe. Mit vielen dieser Komponenten tritt ein Organismus auf diverse Weise in Wechselwirkung, etwa wenn er sich Nährstoffe beschafft, Paarungspartner sucht, sich vor Fressfeinden schützt und wenn er sich gegen Kälte, Überhitzung oder Austrocknung wappnet.

Die dabei auf ganz verschiedenen Ebenen auftretenden Wechselwirkungsmuster möchten Ökologen verstehen. Wegen der großen Anzahl von Einflussfaktoren existieren allerdings zu manchen beobachteten Zuständen eine Reihe teils widersprüchlicher Erklärungsansätze.

Dazu ein Beispiel aus der afrikanischen Savanne: In einer Gegend gibt es viele Löwen, einige Gnus und einen recht hohen Pflanzenbewuchs. Woanders wurden die Löwen ausgerottet, die Gnus haben sich stark vermehrt, und das Gras ist überall kurz gefressen. Man ist versucht, den kahlen Zustand der zweiten Landschaft dem Fehlen von Löwen zuzuschreiben, weil sie den Bestand der Gnus niedrig gehalten hätten. Damit verträte man eine etablierte Ansicht. Nur muss das nicht zutreffen. Vielleicht wächst Gras am zweiten Standort schon deswegen schlechter, weil dort weniger Regen fällt. Auch Buschfeuer der letzten Zeit wären in Betracht zu ziehen, ebenso die Bodenqualität. Und womöglich gibt es unterschiedlich viele andere weidende Arten. Nicht zuletzt könnten sich die Pflanzen der ersten Gegend sogar mechanisch oder chemisch besser vor Fraß schützen. Das bedeutet: Bevor ein Forscher aus seinen Beobachtungen Schlüsse zieht, muss er viele Hypothesen abklären. Aber selbst wenn es ihm schließlich gelingt, hinsichtlich der beiden Orte einen überzeugen-

AUF EINEN BLICK

LEBENSRÄUME INSPIZIEREN

1 Noch hat die Ökologie keine allgemeinen wissenschaftlichen Gesetze zur inneren **Dynamik von Ökosystemen** gefunden. Dennoch zeichnen sich langsam die wichtigen übergeordneten Prozesse ab.

2 Im Labor lässt sich die **Funktionsweise ökologischer Systeme** nur unzureichend aufklären. Eher gewinnen Wissenschaftler Erkenntnisse in der **Wildnis** selbst: an zerstörten Lebensräumen; bei Versuchen, ein Gebiet wieder aufzubauen; und mit gezielten Manipulationen.

3 Einen früheren Zustand nochmals exakt wiederherzustellen, ist utopisch. Was als ursprünglich gilt, entspringt **kulturellen Vorstellungen**. Und zukünftige Entwicklungen lassen sich selbst bei kontrollierten Studien nur bedingt vorhersagen.

»Rainforest Cube«, Würfel vom Regenwald, nannte der amerikanische Künstler Frank Ippolito dieses Bild, das er 2004 malte. Ein Ökosystem wirkt nur auf den ersten Blick chaotisch. Denn genaue Betrachtung enthüllt Stoffflüsse und Beziehungsmuster zwischen Organismen.

den Zusammenhang herzustellen, kann es geschehen, dass ein akademischer Jungspund in einer dritten Gegend herausfindet, dass dort alles ganz anders funktioniert.

Die neuen Ideen werden meist im Elfenbeinturm ausgebrütet – dann aber, auf der Suche nach dem immer komplizierten Warum, folgen viel harte Arbeit vor Ort sowie heftige Diskussionen mit Kollegen. Das alles machen Forscher nicht nur aus akademischem Interesse. Uns alle betrifft es, ob und wie Klimawandel, Vernichtung von Wäldern, Artensterben oder sich ausbreitende fremde Arten Einfluss nehmen zum Beispiel auf Luftqualität, Wasserversorgung, Krankheiten oder Fischbestände und vieles mehr (siehe SdW 9/2008, S. 68). Die Gesellschaft fordert von der Wissenschaft Antworten. Nur können wir Forscher die erst liefern, wenn wir wissen, wie sich die Bausteine zusammenfügen.

Selbst die einfachsten Ökosysteme erweisen sich als so verwoben, dass es fast unmöglich erscheint, sie mit allgemeinen Gesetzen zu beschreiben. Nur wenige der ganz großen Rätsel ließen sich bisher einigermaßen zufrieden stellend beantworten. Bei den meisten Fragen sind wir seit Jahrzehnten nicht wirklich weitergekommen.

Das bedeutet nicht, dass es auf anderen Ebenen keine Fortschritte gab. Die Wissenschaftler haben für Ökosysteme Muster und Regeln aufgedeckt, die weithin zutreffen – einige vielleicht sogar überall. Manche Forscher halten die krampfhafte Suche nach absolut allgemein gültigen Gesetzen ohne-

ROBERT M. PRINGLE

Mit solchen umzäunten, einen Hektar großen Parzellen simuliert das Team des Autors im Mpala-Forschungszentrum in Kenia stufenweise das Verschwinden von Pflanzenfressern verschiedener Größe. Die hohen Drähte halten Elefanten mit Elektroschlägen fern, die tiefer gezogenen unter anderem größere Antilopen. Maschendraht sichert das Gelände gegen die hasengroßen Dikdiks.

hin für überholt, für ein Überbleibsel physikzentrierter Wissenschaftsauffassung. Besser solle man sich damit zufriedengeben, aus den anwachsenden Einzelerkenntnissen ein immer genaueres Gesamtbild zu zeichnen. Da kommt die Forschung tatsächlich gut voran.

Auf vielen Feldern der Biologie bringen experimentelle Studien oft die überzeugendsten Einsichten. Gleiches gilt für die Ökologie. Allerdings lassen sich die in dieser Disziplin hinterfragten Zusammenhänge selten im Labor, Käfig oder Gewächshaus untersuchen. Selbstverständlich erforschen Ökologen manche Teilfragen auch dort – im Bewusstsein, dass sie dann stark vereinfachte Systeme vor sich haben, sozusagen Abstraktionen der Natur.

Warum Berge am Äquator für Tiere und Pflanzen höher sind

Zufällig schreibe ich diesen Text in Bhutan, mit Blick aus einem Tal auf einen kleinen, mit Tannen bewachsenen Berg. Zwischen den Felsbrocken am nebligen Gipfel stehen die Bäume vereinzelt. Zum Tal hin wird ihr Bestand immer dichter. Um die Gründe für dieses Verteilungsmuster unter streng kontrollierten Bedingungen zu untersuchen, müssten mir eine Anzahl gleicher, abgeschirmter Berge zur Verfügung stehen. Dann könnte ich eine berühmte These des amerikanischen Evolutionsökologen Daniel (Dan) Janzen testen. 1967 äußerte er, in den Tropen seien die Berge für die Lebewesen wohl scheinbar höher. Er meinte damit, tropische Tiere und Pflanzen hätten mehr Schwierigkeiten, Höhenbarrieren zu überwinden, weil sie weniger als Organismen gemäßigter Breiten daran angepasst seien, ausgeprägte Temperaturunterschiede zu tolerieren. Denn hier wie dort nimmt die Temperatur je 1000 Meter Anstieg um rund sechs Grad Celsius ab.

In der Stadt Princeton in New Jersey an der amerikanischen Ostküste betragen die mittlere Minimal- und Maximaltemperatur –6 und +24 Grad Celsius. In Liberia im Nordwesten von Costa Rica sind es +22 und +35 Grad, eine deutlich kleinere Differenz. Wie gut eine Art mit höheren oder tieferen Temperaturen zurechtkommt, lässt sich im Labor testen; und die erzielten Ergebnisse passen zu Janzens These. Zudem haben Freilandstudien an zigtausend Tier- und Pflanzenspezies aus ganz Nord- und Südamerika bestätigt, dass in der Natur Organismen nördlicherer Gebiete tatsächlich größere Höhenunterschiede aushalten.

Die Hypothese selbst ist damit allerdings noch nicht erschöpfend geklärt. In ihr stecken weitere Annahmen, die sich nicht so leicht direkt überprüfen lassen. Zum Beispiel muss bei einem Gebirgszug nicht zwangsläufig Kälte das Verbreitungshindernis darstellen, denn auch andere Parameter ändern sich mit der Höhe. Ein sauberer Versuch zu dem Berg in Bhutan würde erfordern, jeweils mehrere identische Berge in verschiedene Gebiete der Erde zu stellen, alles Leben von ihnen zu entfernen, eine neue Besiedlung zu ermöglichen und dann die Entwicklungen des Baumbewuchses jahrzehntelang zu verfolgen.

Ökologen müssen sich auch dessen bewusst sein, dass sie nicht über praktische, gut handhabbare Modellsysteme für klar definierte Experimente verfügen. Das ist in Fächern wie Genetik oder Zellbiologie der Fall, wo man in der Regel mit wenigen Modellorganismen arbeitet, etwa mit *E.-coli*-Bakterien, Bäckerhefe, der Taufliege *Drosophila* oder der Labormaus. Hauptsächlich dieser Beschränkung verdanken jene Disziplinen ihre Erfolge. Denn viele Prozesse auf molekularer und zellulärer Ebene gelten gleichzeitig für eine große Anzahl von Arten. So stark sich Elefanten und Mäuse in vielen zellulären Prozessen ähneln – ökologisch sind beide

durchaus verschieden: Sie ernähren sich anders und haben nicht die gleichen Feinde, und gegenüber Artgenossen sowie fremden Spezies verhalten sich beide ziemlich unterschiedlich. In einem meiner Forschungsprojekte untersuchen wir derzeit die ökologische Bedeutung von Elefanten für Mäuse und andere kleine Tiere.

Dazu starteten Jacob Goheen von der University of Wyoming in Laramie, Todd Palmer von der University of Florida in Gainesville und ich vor einigen Jahren in Zentralkenia ein Projekt auf dem Laikipia-Plateau im Mpala-Schutz- und Forschungszentrum. Wir versuchen dort das Verschwinden großer Tiere nachzuahmen, indem wir sie von einzelnen Flächen fernhalten, und die Folgen für die Pflanzen- und übrige Tierwelt zu beobachten. Gleichzeitig berücksichtigen wir an diesen Orten Unterschiede einiger Klimavariablen, denn die können schon auf geringe Entfernungen voneinander abweichen.

Die vor Ort lebenden Huftiere teilen wir in drei Größenklassen ein: Elefanten und Giraffen gehören zu den so genannten Megaherbivoren; Impalas (Schwarzfersenantilopen) und Zebras sowie einige andere Arten rechnen wir zu mittelgroßen Herbivoren; und zur Klasse der kleinsten zählen vor allem die allgegenwärtigen Dikdiks – Zwergantilopen, die nur ungefähr fünf Kilogramm wiegen und wenig größer als Hasen sind. Wir haben in dem Schutzgebiet 36 Flächen von jeweils einem Hektar ausgemessen, was je etwa einem großen Fußballfeld entspricht. Neun davon dienen zur Kontrolle, werden von uns also nicht manipuliert, 27 Flächen erhielten eine elektrische Umzäunung in einer von drei Varianten. Jede Sorte Feld ist zudem an Standorten mit verschieden viel Niederschlag angelegt.

Schrittweises »Artensterben« simuliert

Wo wir nur die sehr großen Pflanzenfresser von einer Parzelle fernhalten wollen, zogen wir auf zwei Meter Höhe von Solarzellen gespeiste Drähte, die jedem Elefanten, der dagegenkommt, einen Schlag von 7000 Volt verpassen – was übrigens auch ein Mensch verkraftet. Sollen zusätzlich auch die mittelgroßen Huftiere keinen Zugang haben, befestigten wir darunter bis zum Boden hin zwölf weitere horizontal verlaufende Elektrodrähte. Und gegen die kleinen Dikdiks verwenden wir im unteren Teil noch Maschendraht (siehe Bild links).

Elefanten lernen rasch, den Schlag zu meiden. Nur sind sie oft launisch, dann steht wieder einmal eine Zaunreparatur an. Giraffen sind begriffsstutziger – die müssen wir manchmal wegjagen. Doch es gelingt mit den Zäunen, für diese kleinen Flächen die ökologischen Folgen eines schrittweisen Artensterbens zu simulieren, wenn erst die großen, dann die mittleren und schließlich die kleinen Pflanzenfresser ver-

ROBERT M. PRINGLE

Sehr kleine Bahamasinseln eignen sich als Versuchsgelände, um einzelne Arten hinzuzufügen oder zu entfernen. Im geschilderten Fall testen Forscher an kleinen *Anolis*-Echsen, wie sich miteinander konkurrierende Spezies ökologisch verhalten und ob sich daran etwas ändert, wenn ein neuer Fressfeind auftritt – in diesem Fall Rollschwanzleguane.

ROBERT COX

Rollschwanzleguane jagen am Boden und erbeuten dort vorkommende braune Bahamaanolis. Das sollte Letztere zwingen, sich trotz Konkurrenz an eine neue Nische höher im Strauchwerk zu gewöhnen – so die Hypothese von Evolutionsforschern.

schwinden. Wir verfolgen auf den Parzellen sowohl Veränderungen in der Dichte und Zusammensetzung der Pflanzen und Ähnliches als auch unter anderem die Bestandsentwicklung der Nagetiere. Außerdem erfassen wir eine Anzahl weiterer Parameter: etwa Nährstoffzyklen, Abbauraten organischen Materials, Niederschlagsmengen oder die Bodenzusammensetzung. Diese Studien hoffen wir 20 Jahre lang fortsetzen zu können.

Erste markante Unterschiede zeigten sich bald. Die Zäune hatten wir im September 2008 errichtet. Bereits im März 2009 lebten auf Flächen ohne große Huftiere mehr Beutelhamsterratten *(Saccostomus mearnsi)* als vorher, doch das betraf zunächst nur eher trockene Standorte. Wo es mehr regnete, erreichten sie erst ein Jahr später die gleiche hohe Dichte. Schon im November 2008 waren je nach Parzellentyp deutliche Auswirkungen auf die untere Vegetationsschicht zu sehen, sogar auf die Bandbreite der dort gedeihenden Arten. Es dürfte aber Jahre dauern, bis sich auch der Busch- und vor allem der Baumbestand merklich ändern. Wie sich das auswirkt, werden wir erst dann besser verstehen.

Nun verlieren natürliche Ökosysteme nicht nur Arten – wie wir es in dem Keniaexperiment nachahmen –, sondern gewinnen auch neue dazu, was sie ebenfalls entscheidend verändern kann. Oft greift beides sogar ineinander. Heute forciert der Mensch solche Prozesse in besonderem Maß. Deswegen untersuchen Evolutionsforscher und Ökologen mancherorts in kontrollierten Studien, wie sich Lebensräume wandeln und Organismen anpassen, wenn sie dort gezielt einzelne Arten einführen.

Die amerikanische sehr artenreiche Echsengattung *Anolis* eignet sich gut für Beobachtungen und Freilandexperimente vor allem zur Evolution. Die kleinen, meist nur etwas über eidechsengroßen Reptilien kommen in mehreren hundert Spezies unter anderem in Mittelamerika und in der Karibik vor. Zurzeit führen meine Kollegen und ich mit ihnen auf vorgelagerten Miniinseln der Bahamas ökologische Versuche durch (siehe Bild S. 85). Diese Inseln betrachten wir gewissermaßen als überdimensionierte Käfige, deren Insassen wir kontrollieren. Auch gibt es genügend davon, die wir vergleichen können.

Künstliche Umweltzwänge für Echsen der Bahamas

Uns interessiert dabei, wie der braune Bahamaanolis *(Anolis sagrei)* auf »einwandernde« andere Echsenarten reagiert. *A. sagrei* gehört in dem Inselreich zu den häufig anzutreffenden Spezies. Auf größeren Inseln mit Baumbewuchs lebt er oft an denselben Stellen wie die grüne, sonst in vielem recht ähnliche Art *Anolis smaragdinus*. Dann teilen sich beide das Habitat gewissermaßen auf. »Smaragd«-Anolis bevorzugen Bäume, Bahamaanolis eher den Boden. Wahrscheinlich haben sie sich in der Vergangenheit aus Konkurrenzgründen in leicht verschiedene Nischen zurückgezogen und sich offenbar auch körperlich daran ein wenig angepasst, etwa an den Beinen und in der Farbe.

Winzige Eilande besiedelt der Bahamaanolis oft allein. Doch wenn wir dort »Smaragd«-Anolis aussetzen, scheint es für beide nicht schwierig zu sein, sich wie andernorts auch aus dem Weg zu gehen. Was geschieht aber, wenn plötzlich ein Raubfeind auftritt, der auf dem Boden jagt? Können die Bahamaanolis dann trotz der Konkurrenz unbeschadet auf die Bäume ausweichen? Um das zu beobachten, haben wir zusätzlich einige Rollschwanzleguane *(Leiocephalus carinatus)* auf unsere Versuchsinseln gebracht, die mehrfach größer sind als die *Anolis*-Echsen (siehe Bild oben). Nun sind wir gespannt, ob alle drei Spezies auf den Miniinseln koexistieren

können. Womöglich passt sich der Bahamaanolis körperlich stärker ans Baumleben an, wie Evolutionsforscher es teilweise bei ähnlichen *Anolis*-Arten beobachteten. Wir wollen auch erfassen, ob und wie sich das ganze Nahrungsnetz mitsamt Pflanzen, Insekten und Spinnen verändert.

Bei solchen Versuchen ist stets der ethische Aspekt zu berücksichtigen, wozu auch Umweltzerstörung und Faunenverfälschung zählen, ebenso tierisches Leid. Meines Erachtens sind die Grenzen nicht überschritten, wenn Dickhäuter unter den beschriebenen Umständen Stromstöße verpasst bekommen. Ebenso halte ich es für gerechtfertigt, Echsen von einer großen Insel wenige hundert Meter weiter auf kleine, karge Eilande zu verpflanzen. Allerdings würde ich sie niemals in eine Region bringen, wo sie ursprünglich nicht vorkommen – schon gar nicht etwa nach Hawaii, obwohl sie dort bereits eingeschleppt wurden. Stets sind der wissenschaftliche Nutzen und der ökologische Schaden gegeneinander abzuwägen – der sich einerseits schwer vorhersagen lässt und andererseits katastrophal sein könnte. Und nicht zuletzt müssen wir bei unseren Eingriffen mögliche Auswirkungen auf das Wohlbefinden von Menschen bedenken.

Viele theoretisch vorstellbare Studien verbieten sich schon aus solchen Gründen. Allerdings können die Forscher mitunter »natürliche« Experimente beobachten, wie sie sich von allein ereignen, jedoch oft auch als Nebenprodukt menschlichen Eingreifens zu Stande kommen – ob nach Regenwaldrodung, Zähmen von Flüssen, Schaffen von Stauseen, Einschleppen fremder Arten und vielem mehr.

Manche solche Maßnahmen lieferten sogar den Stoff für bahnbrechende Konzepte der modernen Ökologie. Als beispielsweise in den frühen 1980er Jahren mitten im brasilianischen Amazonasgebiet 1000 Quadratkilometer Regenwald für Weideland abgeholzt werden sollten, konnten Forscher die Rancher zumindest überreden, eine Anzahl vergleichbarer Parzellen von einem, zehn und hundert Hektar Fläche stehen zu lassen (siehe Bild unten). Daraus entstand ein bedeutendes wissenschaftliches Projekt, in dem die biologische Dynamik von solchen Waldresten untersucht wird. Es lieferte wesentliche Einsichten unter anderem über die Auswüchse der Fragmentierung eines Lebensraums, den Wert von Randzonen, die Folgen einer mehr oder weniger scharfen Zerstückelung von Populationen sowie über Inseleffekte.

Folgen ökologischer Zerstörung dokumentiert

So traurig es bleibt, dass dieser Urwald und damit unzählige Tiere und Pflanzen unwiederbringlich vernichtet wurden, erbrachte das Projekt bisher immerhin über 500 wissenschaftliche Publikationen. Nicht nur ermöglichen sie den Forschern bessere Vorhersagen zu den Konsequenzen von Rodungen. Auch hunderte Studenten aus Brasilien und anderen Ländern haben dabei viel gelernt und werden ihr ökologisches Wissen weiter tragen.

Ein anderes Beispiel dieser Art betrifft Venezuela. Durch ein Wasserkraftwerk entstand dort 1986 in einem ursprünglichen Waldgebiet eine 4300 Quadratkilometer große Wasserfläche mit zahlreichen neuen Inseln. Von diesen beherbergen die kleineren, wie sich bald herausstellte, keine großen Raubtiere mehr. Infolgedessen explodierten die Bestände ihrer Beutetiere, und die vielen Nager, Affen, Leguane und Blattschneiderameisen richteten die Vegetation auf den kleinen Inseln zu Grunde. Die Forscher, die dies beobachteten, sprachen von einem ökologischen Zusammenbruch.

CORBIS / MINDEN PICTURES / MARK MOFFETT

Bei großflächigen Rodungen mitten im brasilianischen Amazonasregenwald bei Manaus konnten Bauern überredet werden, kleinere Waldflächen stehen zu lassen. Biologen nutzen diese grünen Inseln seitdem für zahlreiche Forschungsprojekte, um die Folgen von verschieden intensiver ökologischer Zerstückelung aufzuzeigen.

ROBERT M. PRINGLE

Der berühmte Gorongosa-Nationalpark in Mosambik, einst einer der arten- und tierreichsten Afrikas, soll wiedererstehen. Er hat unter einem langen Bürgerkrieg und dessen Folgen für die Bevölkerung arg gelitten. Die Regierung des Landes spannt für ihr Ziel außer Anwohnern viele weitere Partner ein, an erster Stelle den Amerikaner Gregory Carr (Bildmitte).

Umgekehrt liefern auch Bestrebungen, zerstörte Ökosysteme wenigstens näherungsweise wieder aufzubauen, der Wissenschaft wertvolle Erkenntnisse. In Afrika etwa versuchen Forscher, in Gebieten mit weit gehend vernichteter Tierwelt Schutzzonen zu deklarieren, den dort dezimierten Beständen Erholung zu gewähren und ausgerottete Arten wieder anzusiedeln. Ein besonderes Beispiel dafür stellt der berühmte Gorongosa-Nationalpark in Zentralmosambik dar. Er liegt im südlichen Ausläufer des Großen Afrikanischen Grabenbruchs. Als er 1960 eingerichtet wurde, noch unter der Kolonialherrschaft Portugals, galt die Region als eine der tier- und artenreichsten in Afrika. 1920 entstand hier ein Jagdgebiet für die Kolonialherren. 30 Jahre später wurde daraus allmählich eine Schutzzone, die viele Touristen anzog.

Klägliche Reste des Gorongosa-Nationalparks nach dem Bürgerkrieg

Noch in den 1960er Jahren kamen in Gorongosa 29 Arten großer Pflanzenfresser zahlreich vor: Elefanten, Flusspferde, Zebras und Gnus ebenso wie Nyalas, Große Kudus und Rappenantilopen. Manche von ihnen bildeten riesige Herden. Rund 20 Raubtierspezies waren anzutreffen, von Löwen bis zu Zorillas, schwarz-weiß gestreiften Mardern. Als das Land nach einem langen Kolonialkrieg 1975 unabhängig geworden war, folgten bald darauf 16 Jahre Bürgerkrieg, die von diesen Tierbeständen wenig übrig ließen. Ohnehin war der Tourismus in dem zerstörten, gelähmten, völlig unterentwickelten Land am Ende.

Bemühungen, Gorongosa wieder zu beleben, scheiterten zunächst. Dabei hätte ein Ökotourismus eine große Chance geboten, in Mosambik eine nachhaltige ökonomische Entwicklung in Gang zu bringen. Allerdings waren es anfangs nicht vor allem Schwierigkeiten ökologischer Art, die einem Wiederaufbau des Reservats im Weg standen. Denn tatsächlich fehlte es der Region dafür praktisch an allem: an technischen und administrativen Infrastrukturen, an Geldmitteln, vor allem aber am Vertrauen der Menschen, die im und um den Nationalpark lebten und ihren Lebensunterhalt mit seinen Ressourcen bestritten. Sie mussten in das Vorhaben einbezogen werden, und es waren mit ihnen erst wieder Vereinbarungen zu treffen. Nur dann würden Rodungen und die starke Wilderei aufhören.

Die Situation begann sich erst ab 2004 langsam zu verbessern, als die Regierung von Mosambik den amerikanischen Philanthropen Gregory Carr dafür gewann, sich der Sache anzunehmen. Der einstige Unternehmer, Jahrgang 1959, widmet sich seit Jahren humanitären Projekten. Im Jahr 2007 kam ein auf 20 Jahre angelegtes Abkommen zur Wiedererrichtung des Nationalparks zu Stande. Unter anderem soll es dafür sorgen, dass sich die stark dezimierten Bestände der meisten größeren Tierarten von Gorongosa allmählich wieder erholen. Manche Tiere werden zudem aus Nachbarländern hierhergebracht. Zu den vielen anderen Aspekten des Projekts gehört etwa die Aufforstung von Flächen mit ruinierter Vegetation mit Setzlingen, so bisher mit über drei Millionen Bäumen.

Bei dem Riesenprojekt stehen zwar humanitäre und Umweltziele im Vordergrund, doch gibt es genügend Möglichkeiten für begleitende ökologische Erhebungen. Sogar eine biologische Feldstation wird eingerichtet. Die Forscher möchten unter anderem verfolgen, wie die Pflanzengesellschaften und die Bestände der kleinen Säugetiere reagieren, wenn große Pflanzenfresser und deren Raubfeinde wieder auftauchen und die Landschaft verwandeln. Das wird sich auch auf die für ein solches Ökosystem charakteristischen Buschfeuer auswirken, die frischen Graswuchs fördern. Zudem dürften

sich die Nährstoff- und Wasserkreisläufe verändern. Manche der Huf- und Raubtiere scheinen sich rasch zu erholen, andere nur sehr langsam, wie etwa die bis auf wenige Dutzend Tiere verschwundenen Löwen. Es fragt sich, ob in solchen Fällen Inzuchteffekte den stark geschrumpften Bestand schwächen und ob es ratsam ist, neue Tiere zuzusetzen.

Bei einem Wiederaufbauprojekt wie in Gorongosa muss man sich darüber klar werden, welche Verhältnisse man anstrebt. Soll man beispielsweise den Zustand direkt vor 1975 anpeilen? Zum damaligen Tierbestand liegt gutes Zahlenmaterial vor. Allerdings leben in dem Gebiet heute mehrere tausend Menschen. Die Portugiesen errichteten die Schutzzone hingegen mit der Prämisse, dass ein Nationalpark menschenleer zu sein habe. Also warfen sie die Bewohner hinaus – aus einer Gegend, die der Homo sapiens seit jeher besiedelt hatte. Das machte Jäger und Bauern zu Wilderern und illegalen Landnutzern. Wer heute so einen Park aufbaut, muss zudem berücksichtigen, dass Mosambik gegenwärtig dreimal so viele Einwohner hat wie 1960. Und die meisten sind extrem arm. Die Planungen müssen diese Menschen mit einbeziehen, und das ist auch ausdrücklich so vorgesehen.

Die Illusion von einer unberührten Natur

Die früheren Vorstellungen von einer sozusagen unberührten, jungfräulichen Natur gelten heute als überholt. Denn was wäre darunter zu verstehen? Der »Vater der amerikanischen Nationalparks« John Muir (1838–1914), der spätere Ökobewegungen stark beeinflusste, hatte ein Amerika vor der Zeit der Europäer vor Augen. Bereits die amerikanischen Ureinwohner verursachten jedoch Zerstörung – indem sie jagten, rodeten, Land bebauten und vermutlich auch zum Aussterben vieler großer Tiere beitrugen. Jede zeitliche Grenzziehung ist willkürlich und kulturell geprägt. Wer den entscheidenden Wandel bei der Entwicklung der Dampfmaschine sieht, dem würde ich die Erfindung des Speers vor mehreren hunderttausend Jahren entgegenhalten, oder besser noch die viel frühere Beherrschung des Feuers. Man könnte sogar bis zum Erscheinen der Menschengattung vor zwei Millionen Jahren zurückgehen.

Einfach ist nicht einmal die Entscheidung, welche Tiere in den Gorongosapark gehören, nähme man kurzerhand den Stand von 1975. Pferde- und Leierantilopen wurden dort vor 1970 ausgerottet. Breitmaulnashörner hingegen, die es seit etwa 1940 nicht mehr gab, hatte man nach 1970 wieder angesiedelt – ebenso 1973 Geparden.

Viel schwieriger ist aber die Handhabe der Zebras. Ihre Herden gehören einfach in die afrikanische Savannenlandschaft, allein schon als Touristenattraktion. Außerdem stellen sie für Löwen, den besonderen Besuchermagneten, eine wichtige Beute dar. Ökologisch gesehen halten sie die Landschaft offen, weil sie auch hohes Gras vertilgen – womit sie für mehr Wuchs und Vielfalt der Pflanzen sorgen und diversen anderen Grasfressern die Weide bereiten. In Gorongosa ist das Steppenzebra heimisch, das hier eine eigene Zeichnung hat und von dem nach dem Bürgerkrieg nur ein winziger Restbestand übrig geblieben war. Derzeit mögen es kaum 30 Tiere sein. Ob daraus jemals wieder eine große und gesunde Population heranwachsen kann, zumal in absehbarer Zeit, ist fraglich. Weiter nördlich und südlich leben jeweils etwas anders gezeichnete Steppenzebras, vielleicht eigene Unterarten. All diese Formen unterscheiden sich genetisch nur wenig voneinander. Derzeit diskutieren die Verantwortlichen heftig, ob sie zumindest für eine genetische Auffrischung sorgen sollen, auf Kosten der Besonderheit der ansässigen Zebras, oder sogar die Population mit eingeführten Tieren aufstocken.

Hierfür, wie in anderen Fragen auch, gibt es keine ideale Lösung. Ökosysteme lassen sich streng genommen eben nicht rekonstruieren. Wer sich um Wiederherstellung bemüht, kann zwar versuchen, die alten Bedingungen – so gut es geht – in Erfahrung zu bringen. Er muss aber dann mögliche Entwicklungen nach seinem Ermessen vorhersehen und seine Arbeit daran ausrichten. Dennoch lässt sich mit dem heutigen Wissen nicht prognostizieren, was letztlich wirklich geschehen wird und welche Arten einmal zu den Gewinnern oder Verlierern zählen. Bei solchen Projekten ist der Mensch eher Gärtner und Künstler, so die Botschaft der Ökologen. Das hat auch etwas Befreiendes.

DER AUTOR

Robert M. Pringle ist Assistenzprofessor für Ökologie und Evolutionsbiologie an der Princeton University (New Jersey) und Junior Fellow der Harvard Society of Fellows.

QUELLEN

Bullock, J. M. et al.: Restoration of Ecosystem Services and Biodiversity: Conflicts and Opportunities. In: Trends in Ecology & Evolution 26, S. 541–549, 2011

Ghalambor, C. K. et al.: Are Mountain Passes Higher in the Tropics? Janzen's Hypothesis Revisited. In: Integrative and Comparative Biology 46, S. 5–17, 2006

Laurance, W. F. et al.: The Fate of Amazonian Forest Fragments: A 32-Year Investigation. In: Biological Conservation 144, S. 56–67, 2011

LITERATURTIPPS

Kareiva, P., Marvier, M.: Mensch und Natur – keine Gegner. In: Spektrum der Wissenschaft 9/2008, S. 68–75
Ohne Rücksicht auf menschliche Belange kann Naturschutz nicht funktionieren.

Marris, E.: Die »neuen« Ökosysteme. In: Spektrum der Wissenschaft 2/2010, S. 68–73
Auch Landschaften mit neuen Arten können wertvoll sein.

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1159811**

© American Scientist

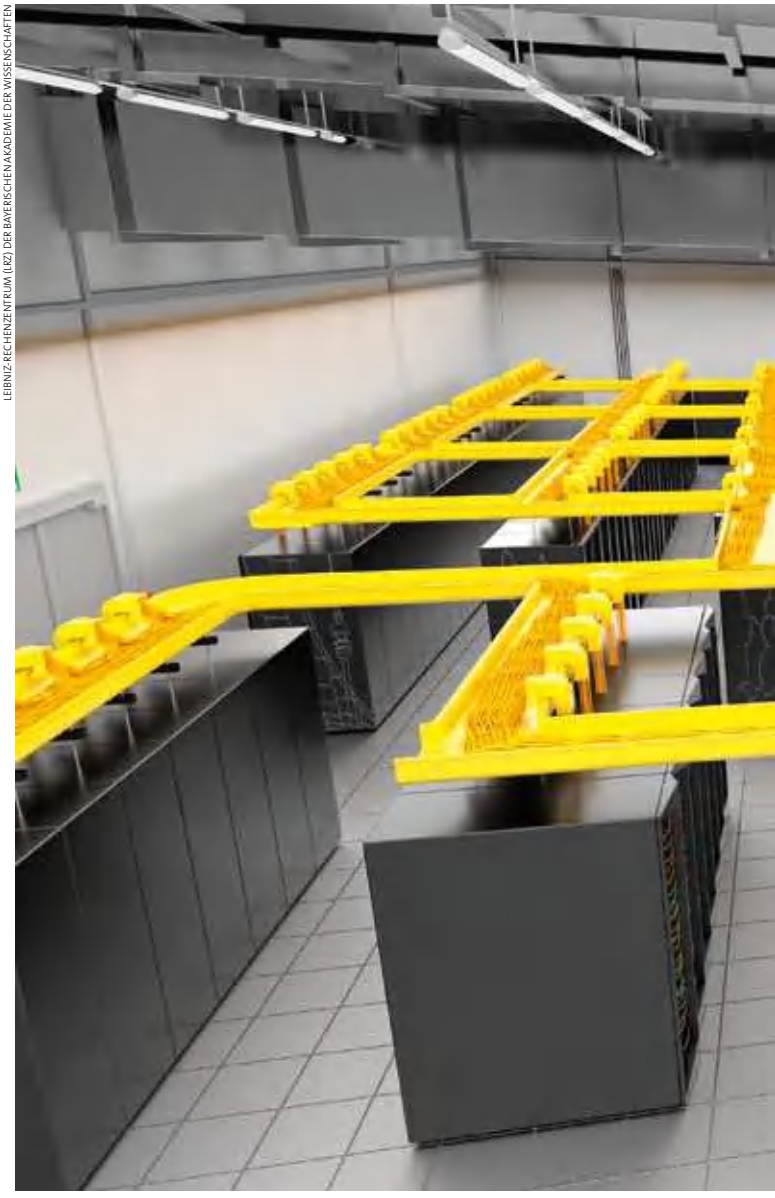
Neues aus der **Supercomputer-Szene**

Bis 2020 sollen die Supercomputer eine Trillion Multiplikationen pro Sekunde bewältigen. Um das zu erreichen, müssen die Entwickler allerdings die Energieeffizienz der Rechner dramatisch verbessern. Ein Bericht von der Internationalen Supercomputer-Konferenz 2012.

Von Hans Günther Kruse

Wenn sich zweimal im Jahr – im Frühjahr in Deutschland, im Herbst in den USA – die Gemeinde der Fachleute zur Supercomputer-Konferenz (ISC beziehungsweise SC) trifft, dann dient diese Veranstaltung wie jede derartige Konferenz dem Fortgang der Wissenschaft und dem Informationsaustausch zwischen Herstellern und Anwendern von Hochleistungsrechnern. Aber zugleich ist sie ein Ereignis, auf dem im Wettstreit der Nationen die Punkte gezählt werden. Wie bei den Olympischen Spielen verstehen die Beteiligten ihr Abschneiden als eine Frage der nationalen Ehre. An die Stelle des Medaillenspiegels tritt die »TOP500«, der Liste der 500 schnellsten Computer der Welt (Kasten S. 95), die seit 1993 regelmäßig zu Beginn der Konferenz veröffentlicht wird.

Lange Zeit führten die USA unangefochten die Liste an, hauptsächlich mit Systemen der Firmen Cray und IBM. Nur ab 2002 konnten das japanische System »Earth Simulator« und sein Nachfolger »Earth Simulator 2« sie für einige Jahre auf die Plätze verweisen, indem sie ein eigentlich als überholt geltendes Bauprinzip auf fantasievolle Weise wiederbelebten: den Vektorrechner (Spektrum der Wissenschaft 9/2002, S. 14, und 7/2003, S. 74).



LEIBNIZ-RECHENZENTRUM (LRZ) DER BAYERISCHEN AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN

AUF EINEN BLICK

DIE SCHNELLSTEN RECHNER DER WELT

1 Das **Nachfolgemodell des »Roadrunner«**, des Rekordrechners von 2008, hat – mit 20-facher theoretischer Leistung – den ersten Platz in der Liste der 500 schnellsten Supercomputer zurückerobert.

2 Bis 2020 sollen die Hochleistungsrechner **eine Trillion (10^{18}) Multiplikationen** pro Sekunde (1 Exaflops) bewältigen.

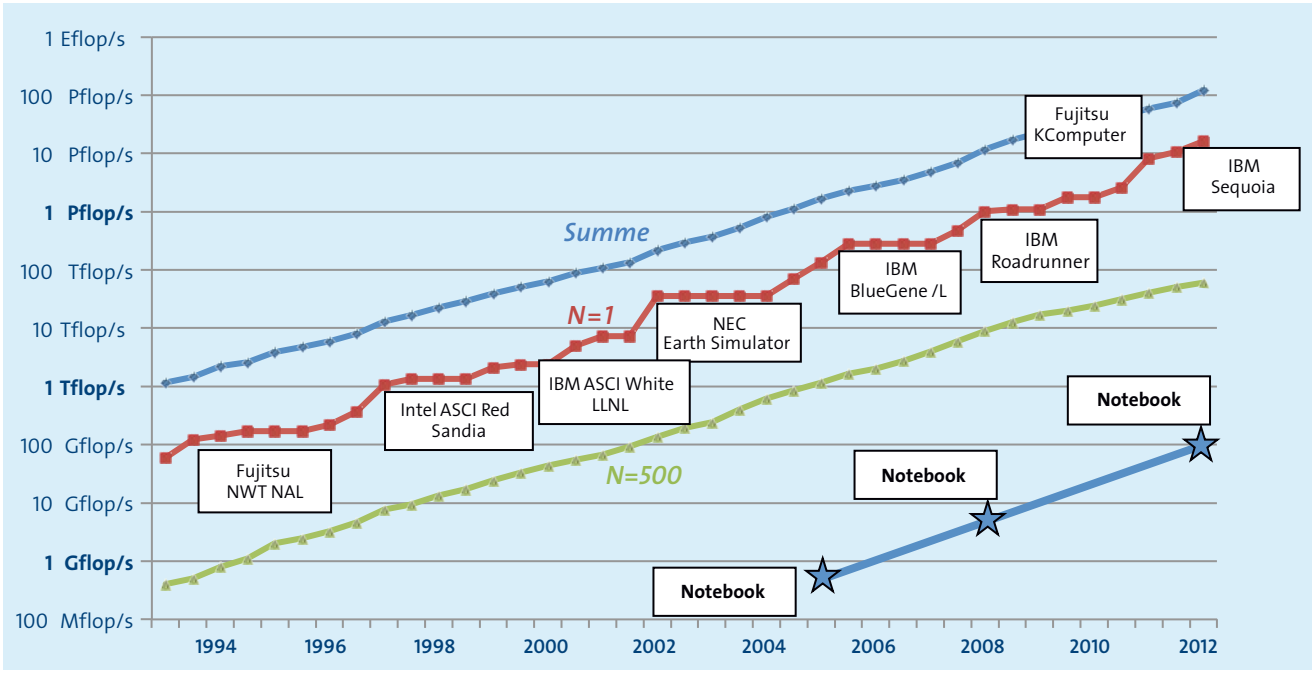
3 Eines der drängendsten Probleme ist die **Energieeffizienz**. Der Strombedarf pro Rechenoperation muss drastisch sinken, damit der Verbrauch eines Exaflops-Rechners nicht überhandnimmt.

Mit der Maschine »Roadrunner« durchbrachen die Amerikaner 2008 als Erste die Petaflops-Schranke (Spektrum der Wissenschaft 8/2008, S. 19). Damit schien ihr Vorsprung auf Jahre hinaus gesichert. Welch ein Irrtum! Schon zwei beziehungsweise drei Jahre später gingen das chinesische System »Tianhe-1A« und der japanische »K computer« in Betrieb; und deren Leistung lag deutlich über der des »Roadrunner«.

Damit erlebten die Amerikaner nach dem »Earth Simulator« einen zweiten »Computenik-Schock«. Entsprechend viel Mühe gaben sie sich, bald wieder die Nase vorn zu haben – mit Erfolg: Die neuen »BlueGene/Q«-Computer von IBM landeten auf den Plätzen 1, 3, 7 und 8 und verdrängten damit ihre fernöstlichen Konkurrenten auf die Ränge 2 und 5.

Auch unterhalb der Spitzenplätze gibt es von einer Ausgabe der Liste bis zur nächsten heftige Bewegung. Der illustre Kreis der ersten 50 verliert alle halbe Jahre mehr als die Hälfte seiner Mitglieder. Und die Helden von gestern sind die Verlierer von übermorgen: Wenn der bisherige Trend sich fortsetzt, wird der nagelneue »Hermit« der Universität Stuttgart (Platz 24), mit ungefähr einem Petaflops der Stolz des Technologielandes Baden-Württemberg, in drei Jahren von der Liste verschwunden sein. Erstaunlich, dass sich unter den ersten zehn Listenplätzen überhaupt ein (fast) rein europäisches System behauptet! Die »Curie thin nodes« (Platz 9) stammen von der französischen Firma Bull.

Der zurzeit schnellste deutsche Rechner SuperMUC (Platz 4 auf der internationalen Rangliste) besteht wie jeder Supercomputer aus unspektakulären grauen Kästen, die eine ganze Halle füllen. Nur die Verbindungsleitungen zwischen den Teilsystemen verlaufen nicht im Boden, sondern in den auffälligen gelben Rinnen.



Im halblogarithmischen Diagramm erscheint der exponentielle Anstieg der Rechnerleistung mit der Zeit als Gerade – mit geringen Abweichungen. Nur auf Platz 1 der Liste TOP500 (*N* = 1) gibt es gelegentlich merkliche Sprünge, so 2002, als der Earth Simulator seinen Vorgänger um das Fünffache überbot. Bei der Leistung des Letztplatzierten (*N* = 500) und der Summe über alle Listenmitglieder gehen solche Ausreißer in der statistischen Mittelung unter. Unten zum Vergleich die Leistung eines Notebook-Computers.

Supercomputer sind selbst für hoch entwickelte Volkswirtschaften kein wirklich preiswertes Mittel, um den Nationalstolz zu befriedigen. Immerhin kostet das einzelne Gerät um die 100 Millionen Dollar, und richtig Freude daran hat man nur für ungefähr zwei Jahre – dann ist das Nachfolgemodell angesagt. Gleichwohl geht allem Anschein nach das Wettrennen zwischen den USA, China, Japan und Europa weiter, wie deren Entwicklungsprogramme eindrucksvoll zeigen. Auf der aktuellen Konferenz wurden sie in sehr unterschiedlicher Weise präsentiert, aber alle haben im Prinzip das gleiche Ziel: bis 2020 Maschinen mit der 100-fachen Leistung des heutigen Spitzenreiters zur Verfügung zu stellen. Das wäre dann ein Exaflops oder auch 1000 Petaflops (10^{18} Flops).

Platz 1: Ein weiterentwickelter Roadrunner

Dieses Datum ergibt sich auch, wenn man die bisherige Entwicklung (Grafik oben) in die Zukunft extrapoliert. In dieser Beziehung ist die Computertechnik wahrhaft einzigartig: Sie erreicht ungefähr alle elf Jahre eine Leistungssteigerung um den Faktor 1000 und nötigt damit ihre Anwender, ein neues, im Übrigen ungebräuchliches griechisches Präfix zu lernen – und das seit immerhin 40 Jahren. Dieses »mooresche Gesetz« bleibt weiterhin unangefochten gültig, obgleich die Miniaturisierung der Schaltkreise, bislang die wesentliche Treibkraft des Fortschritts, an physikalische Grenzen stößt (Spektrum der Wissenschaft 2/2011, S. 90).

Wie haben die USA diesmal ihren Spitzenplatz zurückerobert? Eine erste vorläufige Antwort lautet: mit Masse. In gewissen Grenzen ist das möglich. Wenn man doppelt so viele Rechenknoten zu einem Cluster zusammenschaltet, könnte der theoretisch fast doppelt so viele Berechnungen pro Sekunde erledigen – sofern der erhöhte Datenverkehr zwischen den Einzelrechnern ohne größeren Verzug abläuft und es gelingt, alle Prozessoren so intensiv auszulasten wie zuvor.

Es ist in der Tat bemerkenswert, dass IBM seinen ersten Platz nicht mit einem grundsätzlich neuen Konzept erzielt hat, sondern mit derselben Architektur namens »BlueGene«, mit der schon vor vier Jahren der »Roadrunner« die Petaflops-Marke knackte. Allerdings haben die Erbauer des Systems »Sequoia« die ungefähr 98 000 Rechenknoten mit je 16 Prozessorkernen nicht einfach genauso zusammengestöpselt wie das Vorgängermodell. Fast 1,6 Millionen Prozessoren gleichzeitig zu beschäftigen, erfordert erhebliche Anstrengungen in der Programmierung. Dass die Überschreitung der Millionenschwelle gelungen ist, wird für die nächsten zwei Jahre Maßstäbe setzen – wenn bis dahin nicht das Prinzip der Cluster-Architektur (Kasten S. 96) ohnehin einem überlegenen weichen muss.

Darüber hinaus hat IBM viel Mühe in die Verbesserung der Compiler gesteckt, jener Programme, die das vom Anwender geschriebene Programm in Einzelinstruktionen zerlegen. Dabei wird jeder Elementarbefehl – etwa eine Multiplikation zweier Zahlen – seinerseits in Teilschritte zerlegt, die gestaffelt ausgeführt werden: Während ein Teil des Prozessors die Spätphase von Befehl 1 erledigt, kümmert sich ein anderer um den ersten Schritt von Befehl 2. Diese Fließband-

technik spart grundsätzlich Zeit; wenn aber das Ergebnis von Befehl 1 darüber entscheidet, welcher von mehreren möglichen Befehlen als Nächstes ausgeführt werden soll, müsste eigentlich das Fließband angehalten werden, und der Zeitgewinn wäre dahin. Stattdessen lässt man den Prozessor eine der beiden Alternativen (möglichst die wahrscheinlichere) oder sogar beide durchrechnen und verwirft hinterher diejenige, die sich als die falsche herausgestellt hat. Diese »spekulative Ausführung«, die auf den ersten Blick wie unnötige Doppelarbeit aussieht, bringt – geschickt programmiert – einen großen Zeitgewinn, weil das Fließband nicht angehalten werden muss.

Insgesamt kommt »Sequoia« damit auf eine Maximalleistung von 16,3 Petaflops – immerhin mehr als das Zehnfache von »Roadrunner«. Für den Linpack-Test (Kasten S. 95), die Grundlage für den Eintrag in die Liste TOP500, löste die Maschine in 23 Stunden ein lineares Gleichungssystem mit ungefähr zwölf Millionen Unbekannten. Dabei waren ihre Prozessoren durchschnittlich 81 Prozent der Zeit beschäftigt, ein Effizienzwert im Mittelfeld.

Für die Zukunft will IBM die Leistung seiner Maschine einerseits auf herkömmliche Weise steigern: durch weitere Verkleinerung der Bauteile. Dadurch passen mehr Prozessorkerne auf einen Chip, und die Signallaufzeiten verkürzen sich. Während in »Sequoia« die Referenzlänge für einzelne Elemente eines Mikrochips 45 Nanometer beträgt, arbeitet man im Labor an der Größenordnung 10 Nanometer. Dann allerdings machen sich die physikalischen Grenzen bemerkbar.

Vom Handy lernen

Andererseits setzt man hier wie in allen, weiter unten skizzierten Projekten zur Leistungssteigerung auf das Prinzip »Co-Design«. Gemeint ist die verzahnte Entwicklung von Hard- und Software – in der Tat eine Neuigkeit, denn bisher pflegten die Hardwaredesigner eine neue Architektur zu entwerfen, und die Softwarespezialisten mussten sich beeilen, dem Gerät Programme auf den Leib zu schreiben, bevor das Nachfolgemodell auf den Markt kam. Die verschiedenen Entwicklungsprogramme wollen den guten Vorsatz »Co-Design« auf verschiedene Weisen realisieren:

➤ In Europa baut das von der EU geförderte Projekt »Mont-Blanc« auf einer Hardwaretechnik aus der Mobiltelefonie auf: ARM (advanced RISC machine) ist eine Weiterentwicklung der Architektur RISC (reduced instruction set computer) mit ihrem kleinen Sortiment aus einfachen Elementarbefehlen (Spektrum der Wissenschaft 5/2000, S. 26). Sie nutzt konsequent die Vorteile der RISC-Architektur, um aus der notorisch knappen Energie des Handyakkus ein Maximum an Rechenleistung herauszuholen. Dasselbe Problem in weit größerem Maßstab hat der Exaflops-Rechner der Zukunft.

ANZEIGE

Zum Nachdenken, Weiterdenken und Miteinanderreden

chrismon plus

Jeden Monat Geschichten über Menschen in außergewöhnlichen Situationen, hintergründige Reportagen und fundierte Kommentare.

Jetzt 3 Ausgaben gratis testen

Unser **Dankeschön** für Sie, wenn Sie nach dem Test chrismon plus weiterlesen: ein **Mini-Billardtisch.**

Bestellen Sie jetzt:

Internet: www.chrismon.de/testen
E-Mail: leserservice@chrismon.de
Telefon: 0800 / 758 75 37 (gebührenfrei)
Fax: 069 / 580 98-226

Selbst mit den BlueGene-Rechnern, die heute zwei Gigaflops pro Watt und damit weit mehr als die Konkurrenz abliefern, würde eine Exaflops-Maschine ein mittelgroßes Kernkraftwerk für sich allein beanspruchen. Um auf den angestrebten Verbrauch von 20 Megawatt herunterzukommen, muss sie einen Faktor 30 in der Energieeffizienz zulegen.

➤ Die High Performance Computing Initiative (HPCI) der japanischen Regierung will Chips der Firma Fujitsu (»Sparc-64VIIIfx« mit bis zu acht Rechnerkernen) mit einem neuen Datennetzwerk verbinden, das einen Datendurchsatz von 85 Gigabyte pro Sekunde bewältigt. Vor allem sollen die Prozessoren eines Knotens unabhängig voneinander mit Kollegen in anderen Knoten kommunizieren können. Das ergibt denselben Effizienzgewinn, wie wenn den Mitarbeitern einer Firma zehn externe Telefonleitungen statt einer einzigen für Gespräche mit anderen Firmen zur Verfügung stehen.

➤ Die chinesische Weiterentwicklung des Projekts Tianhe-1A geht vom Prinzip des homogenen Clusters (Kasten S. 96) ab. Ein neu entwickeltes, leistungsfähiges Netzwerk verbindet ungleiche Partner, nämlich klassische Universalrechnerknoten und spezialisierte GPUs (graphical processing units).

➤ Das amerikanische Energieministerium (Department of Energy, DoE), dem der Betrieb der nationalen Forschungszentren und damit auch der wichtigsten Supercomputer-Standorte untersteht, ist zu der Überzeugung gekommen, dass die gegenwärtig von der Industrie betriebene Entwicklung nicht zu einem energieeffizienten Exaflops-Computer führen wird. Stattdessen entwickelt es einen Chip neuer Art, der aus drei Schichten bestehen wird: zuoberst die optische Kommunikation mit den Nachbarchips, darunter der Speicher und zuunterst die Prozessoren. Dazu gehört eine komplette Neuentwicklung der Software.

➤ Ob Europa sich in diesem Umfang an dem Rennen beteiligen soll, ist umstritten. Die Stärken des alten Kontinents liegen eindeutig nicht in der Hardwareherstellung, sondern in der Softwareentwicklung. Einige Experten plädieren dafür, den Kampf um die Spitzenplätze der TOP500 anderen zu überlassen und sich die benötigte Hardware einfach auf dem Weltmarkt zu kaufen.

IBM

Computer mit Wasserkühlung: Jedes Bauteil des SuperMUC hat nicht nur Strom- und Daten-, sondern auch Kühlwasseranschluss.

Mit dieser Strategie hat Deutschland es immerhin auf Platz 4 der aktuellen Liste gebracht, und zwar mit dem jüngst in Betrieb genommenen »SuperMUC« des Leibniz-Rechenzentrums der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. Das Gerät (Bild S. 90/91) ist jetzt sogar die Nummer 1 in Europa. In der absoluten Leistung bietet er nur ungefähr ein Siebtel des Spitzenreiters Sequoia, glänzt aber mit einer erstaunlich guten Effizienz von 90 Prozent, und das ohne Beschleuniger! Der Rechner, dessen Prozessoren sämtlich von Intel stammen, verdankt seine guten Werte einer hybriden Architektur. Nicht alle Knoten sind gleich; vielmehr besteht die Maschine aus 18 »Inseln«, die jeweils 8192 Knoten des einen Typs (»Sandy-Bridge-EP«) enthalten, sowie einer weiteren Insel aus 8200 Knoten des anderen Typs (»Westmere-EX«). Das sind insgesamt 155 656 Prozessoren. (In der TOP500 sind nur die Knoten des ersten Typs mitgezählt.)

Supercomputer als Heizkraftwerk

Neu am SuperMUC ist auch die Warmwasserkühlung (Bild links unten). Während das Kühlwasser typischerweise mit 16 Grad Celsius in die Maschine einläuft und mit 20 Grad herauskommt, betragen die entsprechenden Werte bei dem Münchener Gerät 40 und 70 Grad. Das auslaufende Wasser hat damit gerade die richtige Temperatur, um das Gebäude zu heizen; nach getaner Arbeit kann es – bei 40 Grad – wieder in die Computerkühlung eingespeist werden.

Ein Supercomputer in Deutschland, der nicht von IBM geliefert wurde, ist erst auf Platz 24 der Liste zu finden. Der Computer »Hermit« am HLRS (Höchstleistungsrechenzentrum der Universität Stuttgart) ist ein Produkt der Firma Cray und basiert auf dem Interlagos-Chip von AMD mit 16 Prozessorkernen. Interessanterweise wird derzeit beim NCSA (National Center of Supercomputer Applications) der University of Illinois in Urbana-Champaign ein System namens »Blue Waters« mit gleicher Architektur (Cray-XE6), aber deutlich höherer Leistung installiert. Diese kommt nicht nur von der weitaus größeren Anzahl an Rechenknoten, sondern vor allem von den 3000 zusätzlichen GPU-Chips.

Die Nummer 9 der Liste, das französische System »Curie thin nodes«, wurde von dem rein europäischen Unternehmen Bull gebaut. Träger ist GENCI (Grand Equipement National de Calcul Intensif), ein Teil der europäischen Initiative PRACE. Es handelt sich um ein hybrides System, das aus drei unterschiedlichen Knotentypen zusammengesetzt ist, jedoch auf der Basis des gleichen Intel-Chips wie der SuperMUC.

Unter den 500 Systemen finden sich noch weitere sehr interessante Architekturen, auch hinsichtlich der eingesetzten internen Netzwerke. Insgesamt sind das billige Gigabit-Ethernet und das wesentlich teurere InfiniBand bei den aktuellen Installationen ungefähr gleich häufig vertreten.

An und für sich sagt die Netzwerkleistung, ebenso wie die Effizienz, kaum weniger über die Qualität eines Supercomputers aus als die schiere Rechenleistung; aber alle diese Merkmale zusammen lassen sich eben in einer linearen Liste wie der TOP500 nicht augenfällig abbilden.

Die schnellsten Rechner der Welt

Die Tabelle zeigt die ersten 20 Einträge der Liste TOP500 vom Juni 2012. Die Leistung eines Rechners wird an der Zeit gemessen, die er benötigt, um ein lineares Gleichungssystem mit einem vorgeschriebenen Algorithmus namens »Linpack« zu lösen.

Maßeinheit ist mittlerweile das Gigaflops (eigentlich Gigaflop/s), das sind eine Milliarde Gleitkommaoperationen pro Sekunde (floating-point operations per second, flops). 1000 Gigaflops sind ein Teraflops; unter 60 Teraflops kommt eine Maschine nicht mehr in die TOP500. Die Spitzenreiter leisten mehrere Petaflops, das sind 1000 Teraflops oder 10^{15} (eine Billiarde) Flops.

Auch bei einer sehr strukturierten Aufgabe wie Linpack gelingt es nicht, alle Prozessoren permanent zu beschäftigen. Die Leistung bei der Lösung dieses (und jedes anderen) Problems liegt daher regelmäßig unter dem theoretischen Maximum. Das Verhältnis der beiden Größen ist die »Effizienz«, also der Anteil der Kapazität, der tatsächlich genutzt wird.

	Name	Hersteller	Betreiber	Land	Baujahr	Prozessoren	Ko-prozessoren	Leistung bei Linpack in Gigaflops	theoretische Maximal-leistung in Gigaflops	Effizienz in Prozent	Strom-verbrauch in Kilowatt	Energie-effizienz in Mflops/Watt
1	Sequoia	IBM	Lawrence Livermore National Laboratory	USA	2011	1572864	0	16324751	20132659,2	81,09	7890	2069,04
2	K computer	Fujitsu	RIKEN AICS	Japan	2011	705024	0	10510000	11280384	93,17	12659,89	830,18
3	Mira	IBM	Argonne National Laboratory	USA	2012	786432	0	8162376	10066330	81,09	3945	2069,04
4	SuperMUC	IBM	Leibniz-Rechenzentrum	Deutsch-land	2012	147456	0	2897000	3185050	90,96	3422,67	846,42
5	Tianhe-1A	NUDT	NSC Tianjin	China	2010	186368	100352	2566000	4701000	54,58	4040	635,15
6	Jaguar	Cray Inc.	Oak Ridge National Laboratory	USA	2009	298592	0	1941000	2627609	73,87	5142	377,48
7	Fermi	IBM	CINECA, Bologna	Italien	2012	163840	0	1725492	2097152	82,28	821,88	2099,45
8	JuQUEEN	IBM	Forschungszentrum Jülich (FZJ)	Deutsch-land	2012	131072	0	1380393	1677722	82,28	657,5	2099,46
9	Curie thin nodes	Bull SA	GENCI, Bruyères-le-Châtel	Frank-reich	2012	77184	0	1359000	1667174	81,52	2251	603,73
10	Nebulae	Dawning	NSC Shenzhen	China	2010	120640	64960	1271000	2984300	42,59	2580	492,64
11	Pleiades	SGI	NASA/Ames Research Center	USA	2011	125980	0	1243000	1731836	71,77	3986,96	311,77
12	Helios	Bull SA	IFERC, Rokkasho	Japan	2011	70560	0	1237000	1524096	81,16	2200	562,27
13	Blue Joule	IBM	STFC, Warrington	Großbri-tannien	2012	114688	0	1207844	1468006	82,28	575,31	2099,47
14	TSUBAME 2.0	NEC/HP	GSIC, Tokio	Japan	2010	73278	56994	1192000	2287630	52,11	1398,61	852,27
15	Cielo	Cray Inc.	Los Alamos National Laboratory	USA	2011	142272	0	1110000	1365811,2	81,27	3980	278,89
16	Hopper	Cray Inc.	NERSC, Berkeley	USA	2010	153408	0	1054000	1288627,2	81,79	2910	362,2
17	Tera-100	Bull SA	Commissariat à l'Energie Atomique	Frank-reich	2010	138368	0	1050000	1254550	83,7	4590	228,76
18	Oakleaf-FX	Fujitsu	Universität Tokio	Japan	2012	76800	0	1043000	1135411	91,86	1176,8	886,3
19	Road-runner	IBM	Los Alamos National Laboratory	USA	2009	122400	110160	1042000	1375776	75,74	2345	444,35
20	DiRAC	IBM	University of Edinburgh	Großbri-tannien	2012	98304	0	1035295	1258291	82,28	493,12	2099,48

Abkürzungen: RIKEN AICS = RIKEN Advanced Institute for Computational Science, Kobe; NSC = National Supercomputing Center; CINECA ist ein Forschungsverbund italienischer Universitäten; GENCI = Grand Equipement National de Calcul Intensif; IFERC = International Fusion Energy Research Center; STFC = Science and Technology Facility Council; GSIC = Global Scientific Information and Computing Center; NERSC = National Energy Research Scientific Computing Center.
Nähere Einzelheiten unter: www.top500.org/list/2012/06/100

Auch dem Energieverbrauch eines Systems kommt zunehmende Bedeutung zu, und zwar nicht nur wegen der stark steigenden Kosten. Mittlerweile dient ein erheblicher Teil der Energie nicht zum Rechnen, sondern zum Abführen der dabei erzeugten Wärme. Diesen Teil des Aufwands könnte man einsparen, indem man entweder die Maschine in sehr kalten Gegenden aufstellt und die Luft das Kühlen erledigen lässt oder, wie beim SuperMUC, die Überschusswärme an einen weiteren Verbraucher verkauft. Besser als solche Lösungen wäre es, man änderte die Architektur so ab, dass man mit weniger Hardware und damit mit weniger Energie bei gleicher Leistung auskommt. Diese Strategie scheint aber gegenwärtig nicht die oberste Priorität bei den Entwicklern und Computerwissenschaftlern zu genießen.

Genaues Nachrechnen spart 80 Millionen Dollar

Kann man denn mit der gigantischen Rechenkapazität, die auf der Supercomputer-Konferenz und in der zugehörigen Liste zur Schau gestellt wird, über den Gewinn an nationalem Prestige hinaus überhaupt etwas anfangen? Allerdings! Die klassischen Anwender sind Wissenschaftler, die ein im Prinzip unendlich vielgestaltiges und komplexes System simulieren wollen. Die können eine höhere Rechenleistung ohne Weiteres nutzen, um ihr Problem etwas genauer zu beschreiben (und werden dabei an keine Grenze stoßen, denn die Realität ist komplizierter als jede Beschreibung):

- Astrophysiker vollziehen die Entwicklung des Universums vom Urknall bis heute mit vielleicht dreimal so vielen simulierten Sternen nach wie bisher (Spektrum der Wissenschaft 11/2011, S. 84).
- Für medizinische Zwecke ist es sinnvoll, die Bewegung des menschlichen Herzens räumlich und zeitlich so fein aufzulösen, dass selbst die Nummer 2 der Liste am japanischen RIKEN-Institut für einen halben Herzschlagzyklus zwei Tage Rechenzeit benötigt.
- Einen ganzen Tag arbeitete das französische System Curie thin nodes an der Modellierung eines chemischen Prozesses, der bei neurodegenerativen Erkrankungen, insbesondere der Alzheimerdemenz, eine Rolle spielt.
- Klimaforscher rechnen das atmosphärische Geschehen für ein dichteres Netz von Punkten auf der Erdoberfläche durch, mit dem Effekt, dass sie das Klima der Zukunft auch für kleinere Regionen vorhersagen können. Dafür sind die Rückversicherungsgesellschaften bereit, viel Geld zu zahlen. Denn sie müssen künftige Schadenswahrscheinlichkeiten für eng begrenzte Regionen abschätzen können, und die Erfahrungswerte der letzten Jahrzehnte werden wegen des Klimawandels zunehmend unbrauchbar.
- Der spektakulärste Beleg im Rahmen der Konferenz für den Nutzen des Supercomputing kam aus der Erdölexploration. Durch eine Simulation hatte man die geologische Struktur im Untergrund einer bestimmten Region rekonstruiert und für viel versprechend befunden. Daraufhin wären Probebohrungen fällig gewesen, die einige Zeit gedauert und ungefähr 80 Millionen Dollar gekostet hätten. Beim Nachrechnen mit deutlich mehr Prozessoren und größerer Genauigkeit löste sich die vermeintlich ölhaltige geologische Struktur in nichts auf; es hatte sich um ein numerisches Artefakt gehandelt. Dieser Supercomputer hat also mit einer einzigen Anwendung seinen Anschaffungspreis bereits eingespielt, indem er der Firma vergebliche Bohrungen ersparte.

Für Aufgaben dieser Art macht der nicht unumstrittene Linpack-Test (Kasten S. 95), der die Problemgröße in das Belieben des Betreibers stellt, sogar einen gewissen Sinn: Der Anwender kann einfach sein Problem durch ein größeres, aber im Übrigen gleichartiges ersetzen. Dieses wiederum lässt sich in eine entsprechend größere Anzahl einigermaßen unabhängiger Teilprobleme zerlegen (»parallelisieren«), die ebenso viele Prozessoren beschäftigen.

Wenn aber die Software mit der Parallelisierung nicht Schritt hält, kann sie zusätzliche Einzelrechner nicht nutzen – oder nur um den Preis, dass der Aufwand für Kommunikation und Datenzugriffe enorm ansteigt. Dieser Aspekt macht allen Supercomputer-Betreibern enorm zu schaffen. Nicht von ungefähr hat sich daher das Prinzip des Co-Designs in allen Entwicklungsprojekten etabliert.

Die Entwicklung neuer und dem hohen Parallelisierungsgrad der Hardware angepasster Software scheint aber nicht richtig voranzukommen – vielleicht auch, weil die theoretische Informatik noch nicht den richtigen Zugang zu dieser Problematik gefunden hat.

Der Bauplan moderner Supercomputer

Die aktuelle Architektur im High-Performance-Computing (HPC) ist der »homogene Cluster« (Spektrum der Wissenschaft 3/2002, S. 88). Zahlreiche gleichartige »Knoten« rechnen im Wesentlichen autonom und tauschen über ein Hochleistungsnetzwerk Daten in der Größenordnung von mehreren Gigabyte pro Sekunde aus. Ein Knoten besteht seinerseits aus einem oder mehreren »Multi-Core-Chips« sowie möglicherweise spezialisierten »Beschleunigern«, das sind Rechenchips mit eingeschränktem Funktionsumfang, aber höherer Geschwindigkeit. In den meisten Fällen handelt es sich bei den Letzteren um zweckentfremdete Grafikchips (graphical processing units, GPUs). Ein Multi-Core-Chip enthält mehrere Einzelrechner (Prozessoren, auch Prozessorkerne genannt), die sich einen gemeinsamen Speicher teilen.

In aller Regel sind die Knoten eines Clusters nicht nur untereinander baugleich, sie spielen innerhalb des Systems auch die gleiche Rolle. Auf allen läuft dasselbe Programm ab, mit jeweils verschiedenen Daten. Es gibt keinen »Chef«, der den anderen ihre Arbeit zuweist. Nur für die Kommunikation mit der Außenwelt ist ein spezielles Mitglied des Clusters allein zuständig.

Neuere Architekturen, die vom Prinzip des homogenen Clusters abweichen, heißen »hybrid«.

Für einige zunehmend wichtigere Zwecke kommt es gar nicht mehr in erster Linie aufs Rechnen an. Für Data Mining, allgemeiner für Datenanalyse und insbesondere Genomanalyse müssen Zahlen nicht mehr addiert oder multipliziert, sondern nur noch auf Gleichheit überprüft werden. Das ist im Gegensatz zum Rechnen eine sehr einfache Operation, im Aufwand vergleichbar dem Transport und der Sortierung der zu vergleichenden Daten. Und die Datenmengen wachsen gerade in der medizinischen Informatik mit ungeheurem Tempo; man schätzt eine Verdopplung alle zwei Jahre. Supercomputer mit ihren riesigen Arbeitsspeichern und ihrem hohen Parallelitätsgrad sind höchstwahrscheinlich ein geeignetes Werkzeug zu deren Verarbeitung.

In Analogie zu Linpack haben Anwender aus dem Gebiet der Datenanalyse einen neuen Maßstab (»Benchmark«) geschaffen und führen eine eigene Bestenliste der Supercomputer. Sie heißt »Graph500«, weil diese Probleme in der Sprache der Graphentheorie formuliert werden.

Neue Problemtypen erfordern neue Architekturen. Es ist schwer vorstellbar, dass ein homogener Cluster für graphentheoretische Anwendungen besonders geeignet ist. Darüber hinaus könnte auf lange Sicht die gegenwärtig dominierende reine Rechenmaschine von einem Universal-Supercomputer abgelöst werden, dessen Leistungsmerkmale man sich heute allerdings noch kaum ausmalen kann.

DER AUTOR

Hans Günther Kruse ist promovierter Physiker und leitete bis 2010 das Rechenzentrum der Universität Mannheim. Außerdem war er lange Jahre Chefredakteur und Mitherausgeber der Zeitschrift »Praxis der Informationsverarbeitung und Kommunikation« (PIK). Sein Interesse gilt seit einigen Jahren der Leistungsanalyse von Cluster-Computern und Server-Farmen.

WEBLINKS

www.isc-events.com/isc12/
Internationale Supercomputer-Konferenz, Hamburg 2012

www.top500.org/
Die Liste der 500 leistungsfähigsten Computer der Welt, mit zahlreichen Zusatzinformationen und Weblinks zu jedem der Systeme der Liste

http://computationalsciencesolutions.com/resources/exascale-computing-reports/international-exascale-software-project-iesp-roadmap/
Dongarra, J. et al.: The International Exascale Software Project Roadmap. Protokoll mehrerer Tagungen eines internationalen Konsortiums, das sich über die Software-Herausforderungen im Supercomputing bis 2020 verständigt hat.

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1159812**

ANZEIGE

Jetzt einfach wechseln:
www.naturstrom.de/spektrum

100 % Ökostrom
Jetzt einfach wechseln!

ÖKO-TEST
RICHTIG GUT LEBEN
Öko-Stromtarif
naturstrom
sehr gut
Ausgabe 05/2011

- 100 % Strom aus Wind- und Wasserkraft
- unabhängig von Kohle- und Atomkonzernen
- Strom überwiegend von dezentralen Erzeugern in Deutschland
- keine RECS-Zertifikate
- Förderung und Bau regenerativer Kraftwerke
- günstiger Preis und faire Konditionen

NATURSTROM AG, Achenbachstraße 43,
40237 Düsseldorf, Tel. 0211-77900-300,
E-Mail: info@naturstrom.de, www.naturstrom.de

naturstrom
Energie mit Zukunft

Neuerscheinungen

Unser besonderer Tipp:

Anthony Kenny

GESCHICHTE DER ABENDLÄNDISCHEN PHILOSOPHIE, 4 BÄNDE

Antike – Mittelalter – Neuzeit – Moderne

2012, 1408 S. m. zahlr. SW-Abb., geb., Primus

Bestell-Nr. 3654

Einführungspreis € 99,90 (D), € 102,70 (A)

gültig bis 01.02.2013, danach kostet das Werk € 149,–

Die 4 Bände sind zum Preis von je € 49,90 auch einzeln erhältlich. Sparen Sie mit der günstigen Gesamtausgabe!

Diese Philosophiegeschichte setzt neue Maßstäbe! Dem britischen Philosophen Anthony Kenny ist etwas gelungen, wonach man im deutschen Sprachraum vergeblich sucht: eine ohne Vorkenntnisse verständliche, ja sogar unterhaltsam geschriebene Philosophiegeschichte von den Anfängen bis zur Gegenwart. In seinem vierbändigen Werk erzählt Kenny die Philosophiegeschichte. Dabei verbindet er gekonnt die Darstellung der Ereignisgeschichte und einzelner Denker mit einer Erläuterungen der Problemgeschichte und philosophischen Argumentation.

Stuart Clark

KOSMISCHE REISE

Von der Erde bis zum Rand des Universums

2012, 240 S. mit 200 Farbabb., geb., Spektrum Akademischer Verlag

Bestell-Nr. 3645

€ 39,95 (D), € 41,10 (A)

Begeben Sie sich auf eine intergalaktische Mission, die Sie durch einen Raum von Hunderten von Trilliarden Kilometern und durch eine Zeitspanne von über 13 Milliarden Jahren führt. Ihr Startpunkt ist unser Heimatplanet Erde. Sie reisen mit Lichtgeschwindigkeit bis an den Rand des Universums und an den Anbeginn der Zeit. Jede Seite eröffnet Ihnen neue atemberaubende Einblicke. Sie durchfliegen Ansammlungen von Staub und Gas, die den Sternen als Brutstätten dienen, entdecken spektakuläre Nebel, beobachten sterbende Sterne und explodierende Supernovae und segeln an ausgedehnten Zonen Dunkler Materie entlang. Mehr als 300 spektakuläre astronomische Aufnahmen und informative Texte vermitteln nachhaltige Eindrücke von den 101 Stationen dieser großartigen kosmischen Reise.

Julian Havil

GAMMA

Eulers Konstante, Primzahlstrände und die Riemannsche Vermutung

2007, XVI, 307 S. m. graph. Darst., geb., Springer

Bestell-Nr. 2359

früher € 32,95, jetzt nur € 9,95 (D), € 10,30 (A)

Ein einzigartiges und allgemein verständliches Buch über die Euler-Mascheroni-Konstante

Jeder kennt die Kreiszahl pi = 3,14159..., viele kennen e = 2,71828... und einige die imaginäre Einheit i. Und dann? Die »viertwichtigste« Zahl ist 0,5772156..., die meist mit dem griechischen Buchstaben Gamma abgekürzt wird.

Jörg Resag

ZEITPFAD

Die Geschichte unseres Universums und unseres Planeten

2012, 400 S. m. 177 Farbabb., geb., Spektrum Akademischer Verlag

Bestell-Nr. 3644

€ 29,95 (D), € 30,80 (A)

Das durchgängig vierfarbige und reich illustrierte Buch des Physikers Jörg Resag stellt das moderne Gesamtbild der Natur-geschichte umfassend dar und lädt den Leser zu einer Zeitreise ein, die beim Urknall beginnt und bis in die Zukunft des Universums führt. Dazwischen geht der Autor auch ausführlich auf erdgeschichtliche Epochen und die biologische Evolution ein. Diese Reise durch die Tiefen der Zeit verändert die Sicht auf unsere Welt und macht deutlich, wie wertvoll und zugleich wie kurz und zerbrechlich unsere eigene Existenz in diesem wundervollen Universum ist.

Bestellen Sie direkt: +49 6221 9126-841 @ info@science-shop.de

Frank Paech

MATHEMATIK – ANSCHAULICH UND UNTERHALTSAM

1. Auflage 2010, 596 S., zahlr. farb. Abb., geb., Hanser

Bestell-Nr. 3700 früher € 29,90, jetzt nur € 12,95 (D), € 13,30 (A)

Dieses fachübergreifende populärwissenschaftliche Buch ist ideal zur Vorbereitung auf ein naturwissenschaftliches oder technisches Studium und unterstützt die Studierenden auch noch während der Anfangssemester. Darüber hinaus eignet es sich hervorragend als gut lesbares Fortbildungsmedium für alle, die ihre Mathematikkenntnisse in Richtung Naturwissenschaft und Technik ausbauen wollen oder müssen.

Christian Hesse

CHRISTIAN HESSES MATHEMATISCHES SAMMELSURIUM

1 : 0 = ∞

2012, 256 S. m. 40 z. Tl. farb., kart., Beck

Bestell-Nr. 3721

€ 14,– (D), € 14,40 (A)

Unentbehrlich x Unermesslich x Unverbesserlich = Hesses mathematisches Sammelsurium. Und zwar für alle: vom manischen Mathematiker bis zum Zahlenangsthasen, für alle Freunde und Feinde dieser extremsten und coolsten aller Wissenschaften. Das Buch ist eine flammende Hommage an die Mathematik nach gut dreißigjähriger Beschäftigung mit ihr aus nächster Nähe.

Manfred Spitzer

DIGITALE DEMENZ

Wie wir uns und unsere Kinder um den Verstand bringen

2012, 368 S. m. 40 Duoton-Abb., geb., Droemer/Knaur

Bestell-Nr. 3694

€ 19,99 (D), € 20,60 (A)

Digitale Medien nehmen uns geistige Arbeit ab. Was wir früher einfach mit dem Kopf gemacht haben, wird heute von Computern, Smartphones, Organizern und Navis erledigt. Das birgt immense Gefahren, so der renommierte Gehirnforscher Manfred Spitzer.

Stefan Palkoska

GESUND & FIT FÜR INGENIEURE, MIT DVD

Alles Wichtige über Bewegung, Ernährung, Motivation, Veränderung, Leistungsfähigkeit, Nachhaltigkeit, Glück

2012, 112 Seiten, mit zahlr. farb. Abb., Palkoska

Bestell-Nr. 3642 € 29,90 (D), € 29,90 (A)

Einfach verständlich und in der Sprache der Ingenieure beschreibt der Autor den nachhaltigen Weg zu einem gesunden und fitten Aussehen. Die Hausaufgaben in jedem Kapitel sorgen für eine interaktive Nutzung des Buches und unterstützen Sie auf Ihrem Weg der Veränderung. Die beiliegende DVD zeigt Übungen, die zum Aufbau der Bauchmuskulatur ideal geeignet sind.

Josef Honerkamp

WAS KÖNNEN WIR WISSEN?

Mit Physik bis zur Grenze verlässlicher Erkenntnis

2012, 224 S. 21 SW-Abb., geb., Spektrum Akademischer Verlag

Bestell-Nr. 3649

€ 24,95 (D), € 25,70 (A)

Was wissen Physiker über die Welt und wie sicher wissen sie es? – Den Autoren bewegten Begegnungen und Gespräche aus seinem Alltag dazu, über die faszinierendsten Fragen nachzudenken: Über Zeit, Materie, Quanten, Zufall und die Realität, bis zu kritischem Rationalismus, Emergenz, Vorwissen sowie die Physik aus der Gottesperspektive.

Werner Gruber,
Heinz Oberhummer,
Martin Puntigam

GEDANKENLESEN DURCH SCHNECKEN-STREICHELN

Was wir von Tieren über Physik lernen können

2012, 296 S., geb., Hanser

Bestell-Nr. 3648

€ 19,90 (D), € 20,50 (A)

Seit 2007 begeistern sie mit ihrer einzigartigen Kombination aus Wissenschaft und schwarzem Humor: Die Science-Busters.

In *Gedankenlesen durch Schneckenstreicheln* begeben sich die beiden Physiker Heinz Oberhummer und Werner Gruber sowie der preisgekrönte Satiriker Martin Puntigam auf eine Reise ins Tierreich. Dabei stoßen sie auf verblüffende und faszinierende wissenschaftliche Phänomene. Wissenschaft für alle: Spektakulär, lehrreich und unterhaltsam.

BUCH & MODELL-SET DINOSAURIER T-REX

Einfach zusammenstecken – ganz ohne Klebstoff

2012, Box mit Buch (32 S.) u. 81 Teilen für ein T-Rex-Modell, Dorling Kindersley

Bestell-Nr. 3720

€ 19,95 (D), € 19,95 (A)

Ganz ohne Klebstoff entsteht aus 81 stabilen Pappteilen ein komplettes Tyrannosaurus-Rex-Skelett, das etwa 30 cm hoch und ganze 80 cm lang ist. Das Buch enthält eine verständliche Schritt-für-Schritt-Anleitung für den Aufbau des Modells, die die einzelnen Abschnitte mit den nötigen Informationen begleitet und dabei zusätzliches Wissen über Aussehen, Verhalten und Lebensraum von Dinosauriern liefert. Ab 7 Jahren.

Alexander Unzicker

AUF DEM HOLZWEG DURCHS UNIVERSUM

Warum sich die Physik verlaufen hat

2012, 304 S. m. Abb., geb., Hanser

Bestell-Nr. 3719

€ 19,90 (D), € 20,50 (A)

Keine Disziplin treibt so seltsame Blüten wie die Physik: Spekulationen über Paralleluniversen etwa oder die String-Theorie, die mit Wissenschaft nicht mehr viel zu tun haben.

Gleichzeitig sind grundlegende Fragen der Physik – wie z.B. die Frage nach der Masse – noch immer unbeantwortet. Doch statt Lösungsansätze von Einstein oder Dirac aufzugreifen, verwendet man lieber Milliarden auf die Suche nach neuen Teilchen und mutmaßt über verborgene Dimensionen. Alexander Unzicker liest der Physik die Leviten – und weist ihr den Weg aus dem Labyrinth, in dem sie sich verlaufen hat.

Ken Taylor

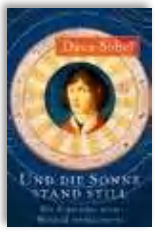
KOSMISCHE KULTSTÄTTEN DER WELT

Von Stonehenge bis zu den Maya-Tempeln

2012, 240 S. m. 200 Farbabb., geb., Kosmos

Bestell-Nr. 3638 € 29,99 (D), € 30,90 (A)

Überall auf der Welt zeigen beeindruckende Bauten das himmelskundliche Wissen unserer frühen Vorfahren. In diesem reich bebilderten Buch beschreibt der Archäologe Ken Taylor ausführlich über fünfzig bedeutende Kultstätten auf der ganzen Welt.



Dava Sobel

UND DIE SONNE STAND STILL

Wie Kopernikus unser Weltbild revolutionierte

2012, 283 S. m. Abb., geb., Berlin Verlag

Bestell-Nr. 3697

€ 22,99 (D), € 23,70 (A)

Ein geheimnisvolles Manuskript, eine unerhörte Begegnung, der Sturz eines Weltbilds – das ist der Stoff dieser Biographie! Elegant erzählt Dava Sobel die Geschichte der Kopernikanischen Revolution und bettet sie ein in die Geschichte der Astronomie von Aristoteles bis zum Mittelalter.

Alice Roberts (Hg)

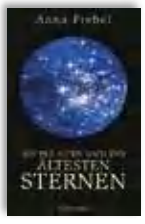
DIE ANFÄNGE DER MENSCHHEIT

Vom aufrechten Gang bis zu den frühen Hochkulturen

2012, 256 S. m. über 800 farbige Abb. u. Ktn., geb., Dorling Kindersley

Bestell-Nr. 3718 € 29,95 (D), € 30,80 (A)

Woher kommen wir? Dieses imposante Werk dokumentiert mit mehr als 800 Abbildungen die Geschichte der menschlichen Evolution. Dabei geht es nicht nur um die biologische, sondern auch um die kulturelle Entwicklung bis zu den frühen Hochkulturen. Beeindruckende Schädelrekonstruktionen von den niederländischen Präparatoren und Künstlern Adrie und Alfons Kennis erwecken unsere Vorfahren zum Leben und halten uns die Schritte der Evolution vor Augen.



Anna Frebel

AUF DER SUCHE NACH DEN ÄLTESTEN STERNEN

2012, 352 S., m. zahlr. Abb., geb., Fischer

Bestell-Nr. 3684

€ 19,99 (D), € 20,60 (A)

Mit Mitte zwanzig entdeckte Anna Frebel während ihrer Promotion den ältesten bis dahin bekannten Stern. Diese ältesten bekannten Objekte überhaupt geben über die ersten Sterne im Universum und die Entstehung der chemischen Elemente Auskunft – dadurch werden sie ein Schlüssel zum Verständnis des gesamten Universums. Anna Frebel gibt klar und verständlich Einblicke in diesen Aspekt der Astronomie und berichtet von ihrer konkreten Arbeit mit den Teleskopen in fernen Gegenden der Welt.

W. Engländer, H.-H. Bergmann

DIE GROSSE KOSMOS VOGELSTIMMEN-DVD

220 Vögel, Filme und Stimmen

2012, 2 DVDs, Begleitbuch, in Box, INFO-Progr. gem. § 14 JuSchG., Kosmos

Bestell-Nr. 1859

€ 44,99 (D), € 49,99 (A)

220 Vogelarten mit ihren Rufen und Gesängen erfreuen uns durch wunderschöne Bilder in Filmen, die Vögel singen dabei schnabelsynchron! Auf der ersten DVD werden 110 Singvögel, auf der zweiten DVD 110 Nicht-Singvögel vorgestellt. Ein Sprecher erklärt jede Darstellung, das Begleitbuch informiert noch ausführlicher.

Bernd Pröschold

STERNSTUNDEN, DVD-VIDEO

Landschaften im Rhythmus des Kosmos

2011, Laufzeit ca. 53 Min., 10 Seiten Booklet

Bestell-Nr. 3630

€ 15,90 (D), € 19,90 (A)

Siebzehn Zeitrafferaufnahmen präsentieren den Sternenhimmel über aufregenden Orten unserer Erde! Das Sternenmeer der Milchstraße, der Tanz der Polarlichter, das Wechselspiel von Tag und Nacht – das sind die Leitmotive dieser DVD. Die bis zu 24-stündigen Zeitraffer-Aufnahmen werden von Musik begleitet. Drehorte: Norwegen, Dänemark, Deutschland, Öster-reich, Schweiz, Frankreich, Kroatien, Kanar. Inseln, Chile. **Lieferbar auch als Blu-ray unter:** www.science-shop.de/artikel/1151887

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich

WUNDER DES UNIVERSUMS

BBC

2012, Laufzeit ca. 200 Min., Verlag: Polyband

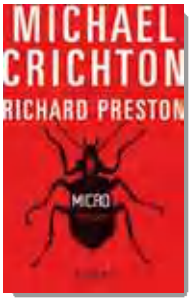
Bestell-Nr. 3656

€ 14,99 (D), € 14,99 (A)

Die Dokumentation nimmt Sie mit auf eine Entdeckungsreise quer über unseren Planeten, von den verbrannten Ebenen Afrikas hin zu den schneebedeckten kanadischen Rockies. Diese Reisen quer über unseren Planeten werden mit spektakulären Bildern aus dem Weltraum kombiniert. Mittels beeindruckender Bilder aus Teleskopen und computergenerierten HD-Aufnahmen liefert *Wunder des Universums* Eindrücke von gigantischen Supernovae, Gammastrahlenexplosionen und kürzlich entdeckten Galaxien und gibt Aufschluss über die entferntesten Bereiche des Universums. Sprachen: Deutsch und Englisch; INFO-Programm gem. §14 JuSchG.

Besuchen Sie uns im Internet unter:
www.science-shop.de

Für Bestellungen außerhalb Deutschlands und Österreichs berechnen wir € 3,50 Versandkosten. Alle Preise inkl. Umsatzsteuer. Preise unter Vorbehalt. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH



Michael Crichton und Richard Preston
Micro
Aus dem Englischen von Michael Beyer.
Karl Blessing, München 2012. 544 S., € 22,95

THRILLER

Lehrreiches Gemetzel

Dieser Horrorroman transportiert durchaus interessante Wissenschaft. Man muss halt in der Lage sein, einige sehr schwache Stellen und die dünne Logik auszublenden.

Wenn ein renommierter Thrillerautor ein Manuskript eines unglaublich erfolgreichen Thrillerautors vollendet, weckt das hohe Erwartungen. Der 2008 verstorbene Michael Crichton versuchte sich mehrfach an der Gratwanderung zwischen Sciencefiction und lächerlichem Thrillerstoff, am besten glückte sie ihm in »Jurassic Park«. Die Verfilmung war ein Kassenschlager und verhalf nebenbei gleich mehreren wissenschaftlichen Themen zu hoher Aufmerksamkeit. Der Zweitautor Richard Preston hat sich mit wissenschaftlich angehauchten Gruselwerken wie »The Hot Zone« und »Panic in Level 4« einen Namen gemacht. Hinter dem Niveau dieser Werke bleibt »Micro« allerdings deutlich zurück.

Zum Inhalt: Kennen Sie den Film »Liebling, ich habe die Kinder geschrumpft«? Dort bringt ein klischeehaft verwirrter Wissenschaftler seine Kinder auf Ameisengröße, und die erleben daraufhin im eigenen Garten eine Safari zwischen den Monstern des Rasens. So ähnlich ist »Micro«, nur ohne Disney-Faktor, dafür mit Gemetzel nach Art von »Nightmare on Elm Street«.

Eine Gruppe ambitionierter Biologiestudenten – dazu ein Linguist – reist auf Einladung eines zwielichtigen Geschäftsmanns nach Hawaii, um dort mit der neuesten Technologie die Botanik nach Wirkstoffen für Medikamente zu durchsuchen. Als der nach ein paar weiteren Seiten schon mehr als nur zwielichtige Geschäftsmann die Studenten im Forschungszentrum herumführt, wird klar, was diese neueste Technologie ist: eine Apparatur, die vom Flugzeug bis zum Piloten alles klein schrumpft, ohne dessen Funktion zu zerstören. Na ja, Leser können durchaus eine krude Idee verkraften, wenn daraus Spannung erwächst.

Das passiert gelegentlich, auch wenn dafür die Handlung noch den einen oder anderen Haken schlagen muss. Getötete tauchen wieder auf, Polizisten spielen sinnlose Nebenrollen, und die Gründe für Ortswechsel werden an den Haaren herbeigezogen. Sehr vorhersehbar werden die Studenten gegen ihren Willen geschrumpft. Irgendwann landen sie dort, wo sie eigentlich die Proben für ihre Forschungsarbeit hätten sammeln sollen: im Wald auf Hawaii. Sowohl an Zahl als auch in der Größe deutlich reduziert, müssen sie in erster Linie ums Überleben kämpfen – bei einer Körpergröße von 1,2 Zentimetern ist das Leben an den Hängen eines Vulkans in Hawaii eben nicht einfach.

Ameisen, Wespen, Hundertfüßer, Spinnen und später auch noch Fledermäuse stehen bereit, aufkommende Gruppendynamik auf drastische Weise zu beeinflussen. Aber die Helden sind Biologen und Toxikologen, Insektenkenner und Spinnenspezialisten. Das gibt den Handelnden Chancen und dem Leser die Gelegenheit, etwas über Gifttiere, die Wirkung ihrer tödlichen Ausscheidungen, die Pflanzenwelt und andere Besonderheiten Hawaiis zu lernen. Das ist nett, informativ und auch dringend notwendig, denn ohne die wissenschaftskommunikativen Einsprengsel würde das Buch nur aus weit gehend sinnfreiem Gemetzel bestehen.

Die grausigen Szenen sind mit merkbarer Hingabe oder zumindest mit routiniertem Sadismus gestaltet; das erste blutige Highlight verspricht sogar Spannung und vermittelt dem Leser das masochistische Vergnügen des Ausgeliefertseins. Der spätere Kampf der Minimenschen im Dschungel Hawaiis ist allerdings eher eine Blutorgie: Ameisen zerlegen noch zuckende Körper, zwei Vögel teilen sich eine geschrumpfte Studentin wie einen Wurm, und ein Protagonist hat mit den Larven einer Schlupfwespe zu kämpfen, die sich in seinem Arm entwickeln. So weit, so widerlich.

»Micro« ist eine Berg- und Talfahrt; und damit ist weniger die Spannung gemeint als vielmehr das schwankende Niveau des Textes. Auf gute Szenen und Dialoge folgen unvermittelt platte Charaktere und endlos durchgekaute Beziehungsdramen. Die Grundidee mit geschrumpften Menschen ist weder neu noch eine aufregende, durchdachte Vision, aber für deftige Schockmomente natürlich tauglich.

Dennoch ist das posthume Erscheinen nicht das Interessanteste an diesem Roman. »Micro« ist lehrreich und schmückt sich am Ende mit einer Literaturliste, die vom ethnobotanischen Lehrbuch bis zum Handbuch der klinischen Toxikologie von Tiergiften reicht. Für den Leser ist es genau dann ein Vergnügen, wenn es ihm gelingt, die richtigen Teile seines Gehirns abzuschalten.

Jörg Wipplinger
Der Rezensent hat Zoologie studiert;
er ist Journalist und Videoblogger (http://diewahrheit.at) in Wien.

Egon Balas
Der Wille zur Freiheit
Eine gefährliche Reise durch Faschismus und Kommunismus
Aus dem Englischen von Manfred Stern.
Springer, Berlin 2012. 438 S., € 49,95

WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Rechts oder links?

Im erbitterten Kampf der politischen Systeme ist Egon Balas mehrmals nur mit knapper Not dem Verderben entronnen. Seine mathematische Karriere kam erst später.

Die wissenschaftliche Welt kennt den mittlerweile 90-jährigen Egon Balas als den großen alten Mann der ganzzahligen Optimierung. Das ist die Suche nach der besten Lösung für ein Problem, dessen Variable nur ganzzahlige Werte annehmen können, zum Beispiel: Ist es besser, für diesen Produktionsprozess vier oder fünf gleiche Maschinen einzusetzen? Oder, etwas abstrakter: Soll der viel zitierte Handlungsreisende auf seiner Tour diese spezielle Straße benutzen (dann steht an der entsprechenden Stelle im Gleichungssystem eine Eins) oder nicht (eine Null)? Einer von Balas' ersten Doktoranden ist Manfred Padberg, der den Lesern dieser Zeitschrift – gemeinsam mit Martin Grötschel – kombinatorische und insbesondere ganzzahlige Optimierung nahegebracht hat (Spektrum der Wissenschaft 4/1999, S. 76).

Ganz im Gegensatz zu dem Klischee, nach dem die Mathematiker ihre größten Leistungen in jungen Jahren zu erbringen pflegen, hat Balas erst mit 37 Jahren seine ersten Gehversuche in diesem Fach unternommen. Die Zeit davor war für ihn ereignisreicher als für einen Durchschnittsmenschen das ganze Leben, weswegen er sie auf Drängen seiner Freunde im vorliegenden Buch aufgeschrieben hat.

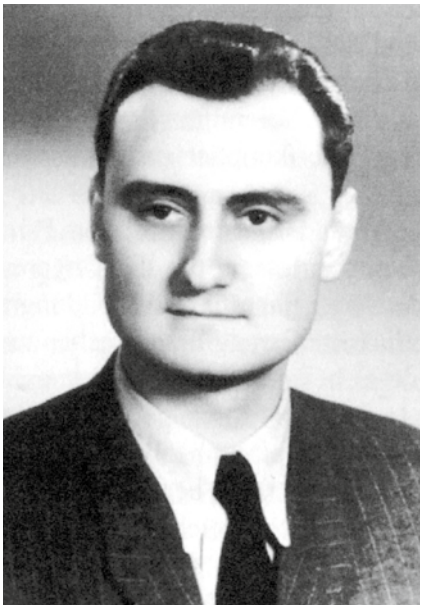
Egon Blatt wird 1922 in eine jüdisch-ungarische Familie in Klausenburg (Siebenbürgen) geboren, das nach dem Ersten Weltkrieg Teil Rumäniens wurde. Aus seiner Kindheit preist er frühe Erfolge im Schachspiel und im Tischtennis sowie vor allem das reichhaltige Kulturleben seiner Heimatstadt, die von einem bunten Völkergemisch bewohnt wird. Gegen Ende seiner Schulzeit tritt er einem Diskussionszirkel bei, der sich auf gesellschaftliche Fragen konzentriert – und wird Kommunist aus Überzeugung.

Inzwischen haben die Nazis die Vorherrschaft übernommen (und Siebenbürgen an Ungarn zurückübertragen), ohne in Ungarn oder Rumänien auf größeren Widerstand zu stoßen. In dieser Situation ist es für den jungen Kommunisten nur plausibel, in den Untergrund zu gehen.

Kleines Detail am Rande: Seine neuen Freunde empfehlen ihm nachdrücklich, seinen Namen – der wegen des deutschen Klangs leicht auf einen Juden schließen lässt – zu ändern; denn auch unter den Kommunisten gibt es einen mehr oder weniger latenten Antisemitismus. So wird aus Egon Blatt Egon Balász.

In der Folgezeit muss er ohnehin aus konspirativen Gründen häufig seinen Namen wechseln, aber das hilft nicht lange: Im August 1944 wird er von der »defensiven Abteilung« (DEF) des ungarischen militärischen Generalstabs für Spionageabwehr verhaftet und wochenlang gefoltert; doch im Gegensatz zu vielen seiner Parteifreunde verrät er keinen seiner Kontakte. Es gelingt ihm, unter den abenteuerlichsten Umständen und Verwendung weiterer falscher Namen zu fliehen und sich schließlich in die Hände der vorrückenden Roten Armee zu begeben.

Inzwischen gehört seine Heimatregion wieder zu Rumänien. Unter der neuen kommunistischen Regierung avanciert der junge Held des Untergrunds, der sich auch noch große Kenntnisse der marxistischen Wirtschaftstheorie angeeignet hat, rasch zu einem Angestellten der rumänischen



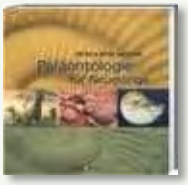
Im Jahr 1946 lernt der 24-jährige Autor die 17-jährige Edith Lővi kennen – eine der wenigen Überlebenden von Auschwitz – und verliebt sich auf der Stelle in sie. Egon und Edith sind bis heute verheiratet und haben zwei Töchter.

Ewald Weber

Das kleine Buch der botanischen Wunder

C.H.Beck, München 2012. 171 S., € 12,95

Pflanzen sind langweilig? Falsch! Bereits in den ersten paar Absätzen lässt der Potsdamer Botaniker Ewald Weber die Faszination der allgegenwärtigen Flora aufblitzen. Hier berichtet zweifellos jemand über seine Passion, und das so pointiert und plastisch, dass man nicht nur über die unglaubliche Größe des Küstenmammutbaums staunt, sondern auch die Begründung, warum er nicht höher als etwa 120 Meter wird, spannend findet. Im Vergleich zu der eingängigen und bildreichen Sprache wirken die wenigen blassen Bleistiftzeichnungen eher fade; dabei hätten sich eindrucksvolle Farbfotos bei dem Thema geradezu angeboten. Eine Geschichte voller Überraschungen von der unglaublichen Diversität, dem hemmungslosen Wachstum, verrückten Verbreitungsstrategien und dem knallharten Überlebenskampf im Pflanzenreich. ARNE BAUDACH

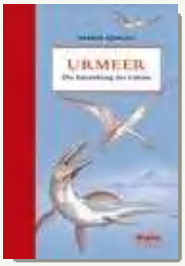


Patrick Wyse Jackson

Paläontologie für Neugierige. Was Sie schon immer über Fossilien, Erdgeschichte und Evolution wissen wollten

Aus dem Englischen von Sven N. Nielsen. Primus, Darmstadt 2012. 96 S., € 19,90

Patrick Wyse Jackson, Geologiedozent und Kurator am Geologischen Museum des Trinity College in Dublin, hat das Kunststück fertig gebracht, auf weniger als 100 Seiten einen allgemein verständlichen und inhaltsreichen Überblick über die Paläontologie zu geben. Dem Hobbypaläontologen erklärt er, was der beachten sollte, wenn er sich in den Steinbruch begibt. Damit überhaupt ein Fossil entsteht, muss der abgestorbene Organismus hinreichend rasch in anoxische Bereiche absinken und/oder unter hohen Druck geraten. Das ist nur an wenigen Stellen geschehen; Jackson erwähnt explizit prominente Lagerstätten wie Burgess Shale, den Solnhofener Plattenkalk und die Grube Messel. Der zweite Teil des Buchs ist einzelnen Gruppen von Fossilien gewidmet. Eine ansprechende Bebilderung und ein Glossar runden das Werk ab. Letzteres ist auch nötig, denn für ein populärwissenschaftliches Buch verwendet Jackson sehr viele Fachbegriffe. MAREN EMMERICH



Dagmar Röhrlich

Urmeer. Die Entstehung des Lebens

mare, Hamburg 2012. 400 S., € 28,–

Kein Künstler könnte genug Fantasie aufbringen, um sich die bizarren Lebewesen auszudenken, die einst unseren Planeten bevölkerten – darunter haushohe »Schultüten« mit Augen und Fangarmen, menschengroße »Tausendfüßer« mit Flossen statt Beinen und meterlange Einzeller, die wie Bettdecken gesteppt waren. Die Wissenschaftsjournalistin Dagmar Röhrlich beschreibt die Geschichte des Lebens von seiner Entstehung, die sich mutmaßlich im Wasser vollzog, durch die Erdzeitalter bis zur Gegenwart, komplett mit Flora, Fauna, geologischer Entwicklung und Klima. Heraus kommt ein aufschlussreiches und unterhaltsames Buch, auch wenn das Fehlen einer zentralen Zeittafel bisweilen den Überblick erschwert. Gute Illustrationen und viele Zusatzkästen sorgen für abwechslungsreiche Lektüre. FRANK SCHUBERT

George L. Legendre

Pasta und Design. Formen und Formeln zum Genießen

Aus dem Englischen von Anna Schleitzer. Springer Spektrum, Heidelberg 2012. 208 S., € 24,95

Gekrümmte Flächen durch Formeln zu beschreiben, ist das tägliche Brot des jungen Londoner Stararchitekten George L. Legendre und seiner Firma IJP. Diese Kunst kann man nicht nur auf Brücken oder avantgardistische Gebäude anwenden, sondern auch auf die gemeine Nudel; schließlich hat sie eine nicht nur gekrümmte, sondern häufig (Fusilli, Spirelli, ...) auch periodisch strukturierte Oberfläche. Da finden Sinus und Cosinus reichlich Verwendung. Legendre hat 93 italienische Nudelsorten mit ambitioniertem Foto, Klassifizierung im Stammbaum, Angaben zur bevorzugten Soße und eben Parametrisierung in Formeln und Grafik in einem Buch verewigt. Ein netter Überblick für den Liebhaber italienischer Küche – aber wozu die Formeln? Davon schmeckt die Pasta nicht besser, und nicht einmal der Nudelmacher hat etwas davon: Der stellt seine Ware doch nicht im CAD-Verfahren her. Mathematiker fahren ja auf so etwas ab; aber der Rest der Welt? CHRISTOPH PÖPPE

Egon Balas 1985

Botschaft in London. Dort hätte er sicher noch Jahre mit der Beobachtung des Klassenfeinds zubringen können, wenn ihn die britische Regierung nicht sehr bald ausgewiesen hätte – nichts Persönliches, nur ein diplomatischer Vergeltungsakt für eine Ausweisungsaktion der Rumänen.

Egon Balaş – inzwischen hat er seinen Namen der rumänischen Sprache angepasst – kehrt im März 1949 nach Bukarest zurück. Er arbeitet in verschiedenen Positionen der Regierung, immer noch überzeugter Kommunist und bestrebt, seine Fähigkeiten für den Aufbau der Planwirtschaft einzusetzen, obgleich auffällig viele seiner Parteifreunde von der Bildfläche verschwinden und etliche von ihnen auf einmal die unglaublichsten Verbrechen gestehen und daraufhin hingerichtet werden. 1952 findet er sich in einem parteiinternen Machtkampf auf der Verliererseite wieder und wird verhaftet, diesmal von der Securitate, dem berüchtigten rumänischen Geheimdienst.

Nun ist auf einmal die Tatsache verdächtig, dass er den Statthaltern der Nazis entronnen ist. Mehr als zwei Jahre nehmen ihn seine Vernehmer in die Mangel, ohne greifbaren Erfolg. Aber wenn in der Zwischenzeit nicht Stalin gestorben wäre, dann wäre Balaş wohl kaum lebend aus diesem Gefängnis herausgekommen.

Nach seiner Entlassung nimmt er seine Tochter in den Arm – und muss erst darüber aufgeklärt werden, dass diese Zweijährige nicht die Zweijährige ist, die er vor seiner Verhaftung zum letzten Mal gesehen hat, sondern deren kleine Schwester, von deren Existenz er bisher nichts wusste.

Balaş arbeitet weiter über Wirtschaftstheorie und gerät dabei an die Mathematik in Gestalt der damals neuen linearen Optimierung. Sein Vertrauen in den Kommunismus bröckelt zunehmend; aber erst 1964 bemüht er sich ernsthaft um Ausreise. Knapp zwei Jahre und ungefähr 2000 Telefonate später lässt der Staat ihn und seine Familie laufen, und sein neues Leben beginnt, zunächst in Neapel. Nach einigen Zwischenstationen geht Egon Balas (der seinen Namen abermals der neuen Umgebung angepasst hat) schließlich 1967 an die Carnegie Mellon University in Pittsburgh (Pennsylvania), der er bis zu seiner Emeritierung die Treue hält.

Es ist eine überaus lebendige und detailreiche Geschichte. Selbst wenn man in Betracht zieht, dass jeder Held sein eigenes Leben etwas heldenhafter zu sehen pflegt als seine Zeitgenossen, steht der Autor nicht nur als ein genialer Wissenschaftler da, sondern auch als Mensch von geradezu unglaublicher Charakterstärke. Zwei Folterkeller verschiedener Diktaturen mit intaktem Rückgrat zu verlassen, ist wahrlich nicht einfach.

Allerdings hat man, von den individuellen Einzelheiten abgesehen, doch gewisse Déjà-vu-Erlebnisse. So anrührend und schrecklich jeder Einzelfall ist: Dass die Nazis den größten Teil der Familie umgebracht haben, dass die Stalinisten einer ganzen Generation begeisterter Anhänger wenn nicht physisch, so doch seelisch das Rückgrat gebrochen haben und dass es den Übriggebliebenen so unglaublich schwerfiel, das als Terror zu erkennen – das hat man schon so oft gelesen, dass das

www.d-fine.de

Manche Rennen werden schon beim Start entschieden!

All die Erfolge und Fähigkeiten, die Sie bis jetzt in Wissenschaft und Studium erworben haben, können Sie bei d-fine direkt für Ihren Start in die Wirtschaft einsetzen. Oder Sie haben den Sprung in die Wirtschaft bereits gewagt, erste Berufserfahrung gesammelt und möchten nun gerne in die Beratung? Auch dann sollten wir uns kennenlernen.

d-fine ist mit über 350 Beratern und Büros in **Frankfurt**, **München**, **London**, **Zürich**, **Wien** und **Hong Kong** eines der führenden europäischen Beratungsunternehmen mit den Beratungsschwerpunkten **Risiko** und **Finanzen**. Wir fokussieren höchste wissenschaftlich-technische Kompetenz auf die anspruchsvollen Herausforderungen unserer Kunden. Wir beraten Banken, Versicherungen, Asset-Manager, Industrieunternehmen und die öffentliche Hand zu allen Themen im Bereich **Handel und Risikomanagement** – von der **Strategie-Entwicklung** über die fachliche **Konzeption** der zugehörigen **Methoden und Prozesse** bis zur professionellen **Implementierung**, vom finanzmathematischen Modell bis zur real-time Schnittstelle, vom einfachen Kredit bis zum exotischen Derivat, vom Ratingsystem bis zur Portfoliosteuerung, von IFRS bis Solvency II.

Unsere Kunden schätzen unseren kompromisslos hohen Qualitätsanspruch und vor allem, dass wir diesen Anspruch auch realisieren. Das beginnt schon bei der Auswahl unserer Mitarbeiter. Wir suchen Sie als **Physiker (m/w)**, **Mathematiker (m/w)**, **(Wirtschafts-) Informatiker (m/w)** oder **Wirtschaftswissenschaftler (m/w) mit entsprechend quantitativ ausgerichteten Vertiefungsrichtungen**.

Sie besitzen einen exzellenten Universitätsabschluss, sprechen fließend Englisch und Deutsch und haben weit überdurchschnittliche **mathematische Fähigkeiten**. Sie haben darüber hinaus sehr gute **IT-Kenntnisse** und sind idealerweise bereits mit Statistik, Numerik und Finanzmathematik vertraut.

Unbedingt erwarten wir von Ihnen **analytisches Denken**, ergebnisorientiertes Vorgehen und exzellente Kommunikationsfähigkeiten. Sie sind teamfähig, erfassen auch sehr komplexe Aufgaben schnell und können sich rasch in neue Umgebungen einarbeiten. Sie haben Beratungstalent, hohe Einsatzfreude, sind flexibel und belastbar und freuen sich auf **wechselnde Einsatzorte** – in Deutschland und weltweit.

Selbstverständlich erhalten Sie eine **intensive Einführung** in Ihr zukünftiges Aufgabenfeld. Wir sind berühmt für unser **anspruchsvolles Training** auf höchstem Niveau, das wir in Zusammenarbeit mit führenden internationalen Universitäten wie z.B. der **University of Oxford**, der **Frankfurt School of Finance & Management** und der **European Business School** durchführen.

Wenn Sie in einem Team hoch begabter und hoch motivierter Kollegen mitarbeiten wollen, große individuelle Freiräume, viel Eigenverantwortung sowie hervorragende Entwicklungsperspektiven suchen, freuen wir uns auf Ihre Bewerbung.

Und durch unser **flexibles Wohnortkonzept** können Sie sogar Ihren jetzigen Wohnort beibehalten.

Willkommen bei d-fine!

d-fine GmbH · Opernplatz 2 · 60313 Frankfurt am Main
Telefon +49-69-90737-555 · careers@d-fine.de · www.d-fine.de

d-fine
we define consulting

nächste Schicksal der gleichen Art keinen echten Neuigkeitswert mehr hat.

Eine Anekdote war mir dagegen neu: In seiner Londoner Zeit lässt sich Balas einen Maßanzug fertigen. Der Schneider nimmt 40 oder 50 Maße und verwirrt dann seinen Kunden mit der völlig unpolitischen Frage: »Tragen Sie rechts oder links?« Ich kannte diese Geschichte nur als Witz.

Den damals angefertigten dunklen Anzug hat Balas immer noch. Er trug ihn 1992, als die breiten Aufschläge gerade wieder in Mode kamen, »zum Rektorenball meiner Universität und erntete damit einen großen Erfolg«.

Christoph Pöppe
Der Rezensent ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Felix zu Löwenstein
Food Crash
Wir werden uns ökologisch ernähren oder gar nicht mehr
Pattloch, München 2011. 320 S., € 19,99

WELTERNÄHRUNG

Die dritte »grüne Revolution«?

Der Agrarexperte Felix zu Löwenstein liefert eine radikal ökologische Antwort auf das Welternährungsproblem und zugleich eine überzeugende Absage an die konventionelle Landwirtschaft.

Das Buch mit dem apokalyptischen Untertitel beginnt mit einer bizarren Geschichte: Bei einem Fernseh-Fresswettbewerb im Frühling 2008 gelang es Sonya aus Bottrop, 167 Hähnchenflügel auf einen Sitz zu vertilgen. Bei Felix Prinz zu Löwenstein, Ökolandwirt und Vorstand des Bundes für Ökologische Lebensmittelwirtschaft (BÖLW), und seiner Familie löst das zunächst großes Gelächter aus – und plötzlich schlägt die Diskussion in die ernsthafte Frage um: Liegt denn der Hunger auf der Welt tatsächlich an einer unzureichenden Menge an Nahrungsmitteln?

Löwenstein ist zwar Agrarwissenschaftler und ehemaliger Entwicklungshelfer, kann aber die Frage auch nicht aus der hohlen Hand beantworten. Also recherchiert er, vergleicht Zahlen und befragt Experten. Ergebnis ist das vorliegende Werk, das sich stark an den von der Weltbank initiierten, 2008 veröffentlichten und heftig umstrittenen »Weltagrarbericht« anlehnt (»Agriculture at a Crossroads«, siehe www.agassessment.org). Seine Schlussfolgerung: Der Versuch, immer höhere Erträge zu erzielen, wird das Problem der Welternährung grundsätzlich nicht lösen. Noch schlimmer: »Gehen wir den Weg der intensiven industriellen Landwirtschaft weiter, dann verheizen wir in einem letzten großen Strohfeuer all das, was künftigen Generationen als Lebensgrundlage dienen muss.«

Im letzten Jahrhundert haben sich die Erträge der konventionellen Landwirtschaft verdreifacht. Durch hochrationalisierte Produktionssysteme sowie den Einsatz von chemischen Hilfsmitteln und genmodifizierten Pflanzen wird mit minimalem Aufwand so viel Grundnahrungsmittel pro Hektar Ackerboden produziert wie nie zuvor. Doch der gewaltige Fortschritt ging mit einer massiven Beeinträchtigung der Umwelt einher.

So ist heute der Boden derart mit Stickstoff gesättigt, dass die Pflanzen nur noch 17 Prozent des neu ausgebrachten Düngers aufnehmen. Der Überschuss gelangt ins Grundwasser oder über die Flüsse bis ins Meer, wo er großen Schaden anrichtet. Ein Fünftel des Meeresbodens in der Kern-Ostsee zwischen Dänemark und den Åland-Inseln ist schon ohne Sauerstoff, weil die Überdüngung zusammen mit der intensiven Viehzüchtung aus Norddeutschland zu einem massiven Wachstum von Algen geführt hat. In diesen »Todeszonen« können sich die Fische nicht mehr vermehren, die Bestände sinken drastisch. Und die konventionelle Landwirtschaft tut der Umwelt noch weitere Schäden an: Sie stößt enorme Mengen an Treibhausgasen aus, Pestizide sammeln sich in der Nahrungskette an, Genmais vergiftet vermutlich nicht nur wie vorgesehen die Schädlinge, sondern auch Nutzinsekten …

Darüber hinaus wirft Löwenstein der konventionellen Agrarwirtschaft vor, sie verschärfe den Hunger, indem sie Abhängigkeiten erzeuge. Die Stickstoffdüngung zum Beispiel lässt nicht nur die Pflanzen schneller wachsen, sie macht auch deren Zellwände weicher. Die Stängel neigen zum Brechen, was den Einsatz hormonaler Wachstumshemmer erzwingt. Durch die rationell zu bewirtschaftenden Monokulturen verarmt der Boden, die Pflanzen werden dadurch weniger widerstandsfähig – und Pestizide unvermeidbar.

Dass ein Hilfsmittel das andere nach sich zieht, mag in unseren Breiten nicht sehr stören. Doch in Entwicklungsländern, wo die Bauern sich oft verschulden, um Saatgut, Dünger und so weiter zu finanzieren, entstehen schnell Teufelskreise des Elends. Am stärksten kritisiert wird dabei, dass die Bauern für genmodifizierte Pflanzen nicht nur Patentgebühren an die einschlägige Firma Monsanto zahlen müssen, sondern die selbst erzeugten Samen nicht zum Nachbau verwenden dürfen. Stattdessen müssen sie immer wieder neues Saatgut kaufen.

Zwei Drittel der Hungernden leben auf dem Land, 70 Prozent der Lebensmittel weltweit werden von Kleinbau-

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

ern produziert. Will man also dem Hunger auf der Welt ein Ende setzen, kommt man um die Kleinbauern nicht herum, sagt Löwenstein. Diese müssten zuallererst souverän bezüglich der eigenen Versorgung werden und zweitens unabhängig von teuren Betriebsmitteln ausreichende Erträge erzielen, ohne ihre Lebensgrundlage zu zerstören. Wie? Durch ökologische Landwirtschaft, denn diese setze auf geschlossene Kreisläufe: möglichst viel aus dem Hof verwenden, möglichst wenig von außen kaufen. Zwar fallen dadurch etliche chemische Hilfsmittel aus, doch die Ökobauern entkommen den meisten Problemen, indem sie diese gar nicht erst entstehen lassen.

So bringen sie den Stickstoff durch organischen Dünger in den Boden sowie durch den Einsatz von Leguminosen, die das Element aus der Luft aufnehmen. Dadurch steigt auch der Humusgehalt des Bodens an, die Pflanzen sind widerstandsfähiger. Im ostafrikanischen Tigray stiegen durch Düngung mit Kompost die Erträge um 35 Prozent im Vergleich zu konventionellen Methoden. Der erhöhte Humusgehalt hält die Feuchtigkeit fest, was der extrem trockenen Region sehr zugutekommt. Auf den Philippinen ist aus einer Kooperation zwischen Bauern und Agrarwissenschaftlern ein nationales Programm geworden. 35 000 Familien erzielten mit 2000 selbst gezüchteten Reissorten und natürlichen Regelungsmechanismen genauso hohe Erträge wie ihre konventionell arbeitenden Nachbarn und konnten im Gegensatz zu jenen noch Eigenkapital bilden.

Diese Erfolgsgeschichten bieten eine erholsame Abwechslung zu der wenig erfreulichen Zustandsbeschreibung der ersten Buchhälfte. Allerdings bleibt fraglich, ob die lobenswerten Ansätze überall ähnlich erfolgreich aufgegriffen würden, vor allem in jenen Regionen, die seit Jahrzehnten auf Subventionen und Entwicklungsgelder angewiesen sind (ein Problem, das der Autor durchaus erwähnt). Das erfordert eine Veränderung der Mentalitäten und vor allem Wissenstransfer; denn hier geht es nicht um die Wiedereinführung der althergebrachten Landwirtschaft (»öko aus Mangel«), sondern um ausgeklügelte Produktionssysteme, deren praktische Umsetzung wesentlich heikler ist als die »der Gebrauchsanleitung auf dem Düngersack oder dem Spritzmittelkanister«.

Doch die von Löwenstein empfohlene »ökologische Intensivierung« stößt auf noch weit ernstere Hindernisse, nämlich korrupte Politik, Konflikte und fehlende Rechtssicherheit: »Warum soll ich erst aussäen, wenn das Stück Acker mir morgen nicht mehr gehört?« Das verhindert schlichtweg jede Art von Landwirtschaft, ob konventionell oder ökologisch.

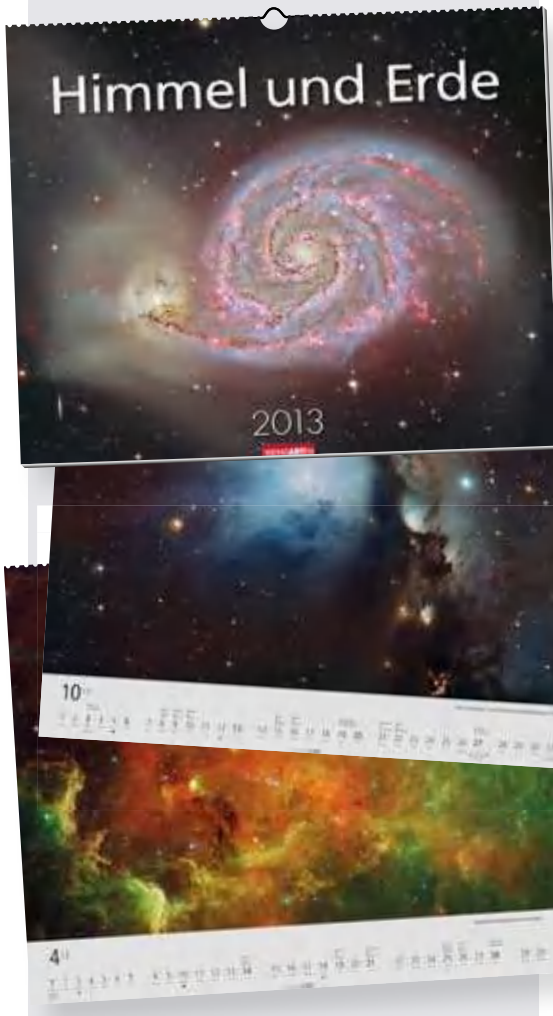
Leider stopft der Autor die Sachverhalte im ersten Teil des Buchs mit einer Fülle politischer und wirtschaftlicher Fakten zusammen und überfordert damit den Leser. Die wenigen Landkarten, die einiges veranschaulichen könnten, sind – grau in grau und mit unscharfen Legenden – kaum zu entziffern, und innerhalb der Hauptkapitel verliert man mangels klarer Gliederung und aussagefähiger Überschriften leicht den roten Faden.

Aber die formalen Mängelchen hat man spätestens im zweiten Hauptteil verdrängt, wenn Löwenstein, der selbst sechs Jahre lang konventionell gewirtschaftet hat, uns in sein Unbehagen beim Umgang mit Pestiziden hineinzieht.

Das Buch ist spannend und veranschaulicht wesentliche Zusammenhänge in intelligenter und unterhaltsamer Weise. In der Debatte zur Welternährung der Zukunft verdient das Plädoyer für ein nachhaltigeres und gerechteres Landwirtschaftssystem auf jeden Fall, gehört zu werden.

Emmanuelle Vaniet
Die Rezensentin ist promovierte Biologin und freie Wissenschaftsjouralistin in Darmstadt.

LESERSHOP



KALENDER
»Himmel und Erde 2013«

Astronomen präsentieren im Bildkalender »Himmel und Erde 2013« ihre schönsten Aufnahmen und lassen Sie an den fantastischen Möglichkeiten der modernen Naturbeobachtung teilhaben. Zusätzlich bietet er wichtige Hinweise auf die herausragenden Himmelsereignisse 2013 und erläutert auf einer Extraseite alle auf den Monatsblättern des Kalenders abgebildeten Objekte knapp und anschaulich. 14 Seiten; 13 farbige Großfotos; Spiralbindung; Format: 55 x 45,5 cm; € 29,95 zzgl. Porto; als Standing Order € 27,– inkl. Inlandsversand

spektrum.com/kalender2013

Spektrum DER WISSENSCHAFT

BRYAN CHRISTIE

Die Mikroben in uns

Die Bakterien, die uns bevölkern, sind zehnmal so zahlreich wie unsere Körperzellen. Insgesamt wiegen sie gut und gern zwei Kilogramm. Die meisten nützen uns, und viele brauchen wir sogar für unsere Gesundheit. Genetische Untersuchungen offenbarten nun ein höchst komplexes Beziehungsgeflecht zwischen diesem unsichtbaren Ökosystem und dem Menschen.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / DANIELA LEITNER

Riesensaurier erfolgreich bis zuletzt

Die gigantischen Sauropoden galten bis vor Kurzem als ein archaisches Fehlexperiment von kurzer Dauer. In Wahrheit blieben sie bis zum Schluss den anderen Sauriergruppen überlegen und brachten sogar ganz am Ende des Erdmittelalters noch neue Arten hervor.

MARIA STENZEL

Eis am Südpol schwindet

Immer mehr Schelfeisflächen rund um den antarktischen Kontinent zerbrechen und schmelzen. Dadurch beschleunigt sich der Abfluss der Gletscher vom Festland, was den Meeresspiegel steigen lässt. Forscher versuchen, das Ausmaß der Bedrohung zu ermitteln.

Der steinige Weg zum Fusionsreaktor

Der Bau des »International Thermonuclear Experimental Reactor« (ITER) ist ein weiterer Meilenstein auf dem Weg zur technischen Nutzung der Kernfusion. Doch bis das Sonnenfeuer auf der Erde kontrolliert brennt und uns mit unerschöpflicher Energie versorgt, sind noch viele Probleme zu lösen.

Heikle Preisfindung für Finanzprodukte

Seit der Lehman-Pleite weiß der Markt, dass auch große Banken zusammenbrechen können, was zuvor als ausgeschlossen galt. Deshalb müssen alle Beteiligten das Risiko eines Kredits unter Banken neu einschätzen und einen Preis dafür finden – mit überraschenden Ergebnissen.

NEWSLETTER

Möchten Sie regelmäßig über die Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?

Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:
www.spektrum.com/newsletter

DIE VORTEILE EINES ABONNEMENTS

So vielfältig wie unser Magazin!

1 Zwölf Ausgaben zum Preis von nur € 84,– inkl. Versand Inland (statt € 94,80 im Einzelkauf); für Schüler, Studenten und Azubis auf Nachweis sogar nur € 69,90

2 2 in 1: Sie erhalten nicht nur die Printausgabe, sondern können auch schon drei Tage vor dem Erstverkaufstag auf die Digitalausgabe zugreifen!

3 Kostenloser Zugriff auf das Onlineheftarchiv von **Spektrum der Wissenschaft** mit fast 9000 Artikeln

4 Bonusartikel und Gratisdownloads ausgesuchter Sonderhefte im Internet

5 Verbilligter Erwerb des Produkts des Monats

Produkt im Oktober

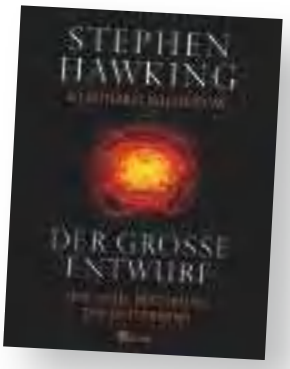
Stirlingauto

6 **Zusätzlich für Ihre Abobestellung erhalten Sie ein Präsent Ihrer Wahl!**

Weitere Präsente finden Sie im Internet ...

Acht verschieden gestaltete Bausteine, die jeder für sich aus mehreren Einzelwürfeln bestehen, werden auf einer Grundplatte zu den unterschiedlichsten Formen zusammengebaut. Das **Baumeisterspiel** fördert Kombinatorik, Denk- und räumliches Vorstellungsvermögen.

Das fadengeheftete **Din-A4-Spektrum-Artbook** bietet Ihnen auf 160 Seiten Platz für Ihre Notizen. Mit Verschluss- und Lesezeichenband sowie einer Stiftschlaufe.



Um das Universum auf fundamentalster Ebene zu verstehen, müssen wir nicht nur wissen, wie sich das Universum verhält, sondern auch: Warum gibt es etwas und nicht einfach nichts? Warum existieren wir? Das Buch »Der große Entwurf« versucht die Antworten zu geben.

Dieses und zusätzliche Aboangebote wie **Geschenkabo**, **Miniabo** oder **Leser-werben-Leser-Abos** finden Sie unter:

www.spektrum.de/abo

Spektrum DER WISSENSCHAFT
WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

online: spektrum.de/abo
E-Mail: service@spektrum.com
Tel.: +49 6221 9126-743
Fax: +49 6221 9126-751

Weniger Neben.
Mehr Wirkung.

Mehr Lebensqualität durch Personalisierte Medizin von Roche.

Jeder Mensch ist anders – auch genetisch. Deshalb setzen wir auf Personalisierte Medizin: Unsere Bereiche Pharma und Diagnostics arbeiten gemeinsam an Tests und Wirkstoffen, um Therapien besser auf die Bedürfnisse von Patienten abzustimmen.

Unsere Innovationen helfen Millionen Menschen, indem sie Leid lindern und Lebensqualität verbessern. Wir geben Hoffnung.

www.roche.de

Roche

Innovation für die Gesundheit

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Riesensaurier
Die wahren Herrscher der Urzeit

NOVEMBER 2012

Spektrum DER WISSENSCHAFT 11/12

ATOMWAFFEN
Uran-Anreicherung per Laser erschwert Rüstungskontrolle

VOGELGRIPPE
Virenforschung in der Kritik

FINANZKRISE
Mathematiker bestimmen Kreditrisiken neu

ÖKOSYSTEM MENSCH

Tausend Billionen Freunde

Schützen Mikroben vor Fettleibigkeit und Autoimmun-krankheiten?

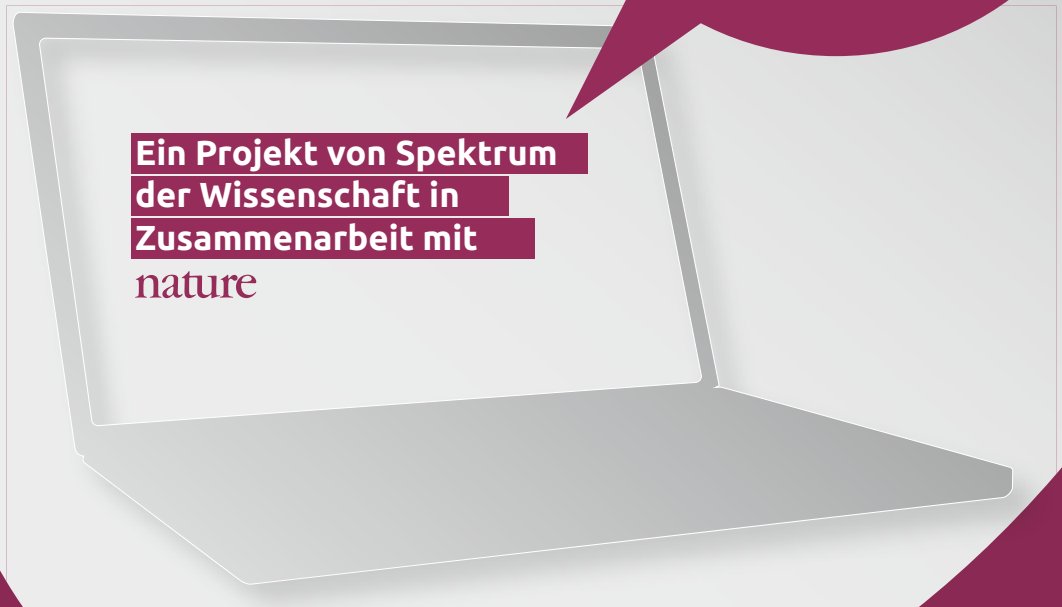
7,90 € (D/A) · 8,50 € (L) · 14,– sFr.
D6179E

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

www.spektrum.de

SciLogs

Diskutieren Sie mit – auf unserem Portal für Wissenschaftsblogs!



Ein Projekt von Spektrum der Wissenschaft in Zusammenarbeit mit
nature

Jetzt auch auf Englisch!

www.SciLogs.com
www.SciLogs.de

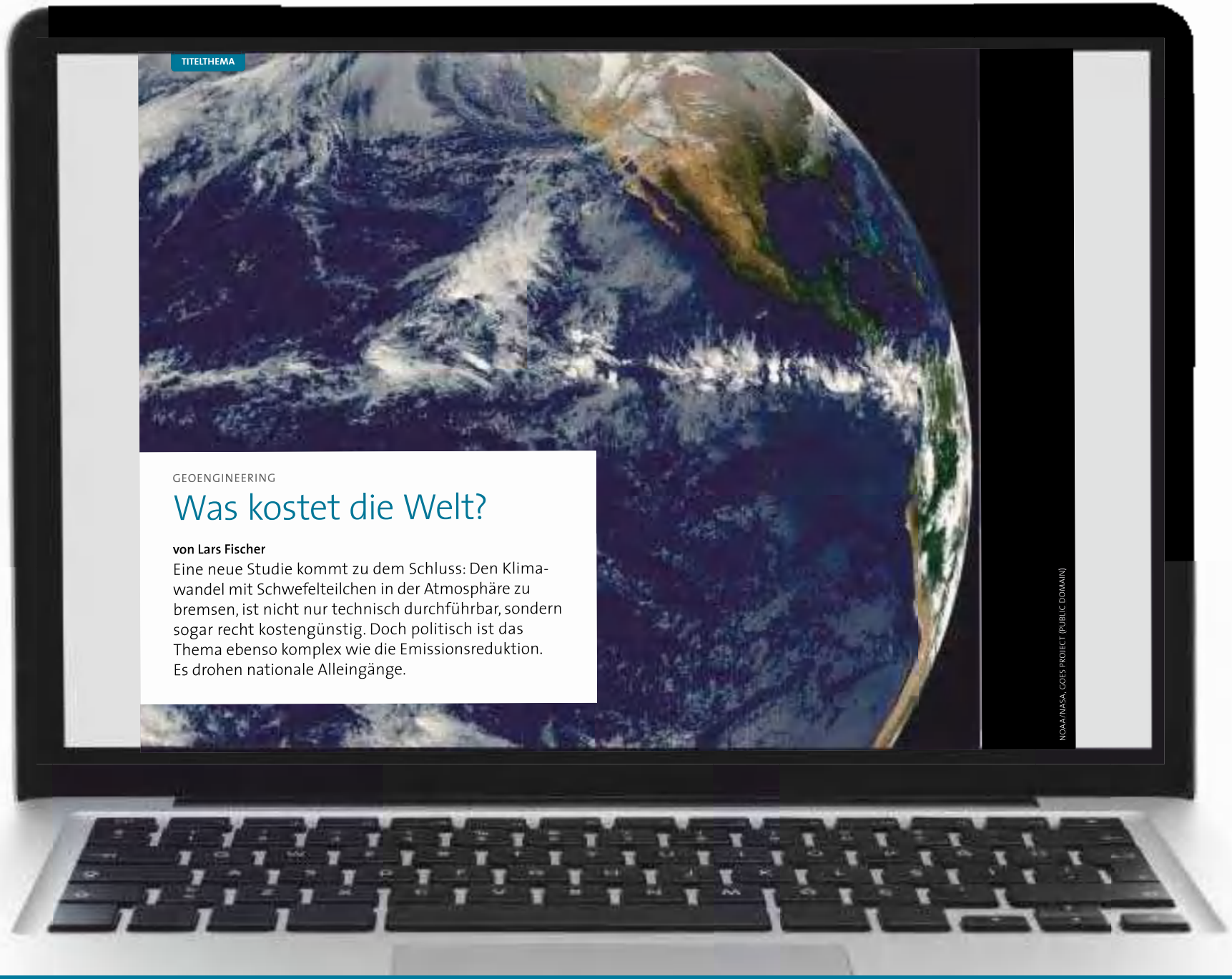
Auf SciLogs bloggen mehr als 100 Wissenschaftler aus den verschiedensten Fachgebieten sowie mehrere Wissenschaftsjournalisten. Ihr Anliegen ist der interdisziplinäre Dialog über Wissenschaft in all ihren Fassetten: Forschung, Anwendung, Politik, Ethik, Werte.

Deutschlands erstes wöchentliches Wissenschaftsmagazin

Testen Sie 4 Ausgaben GRATIS

www.spektrum.de/testwochen

www.spektrum.de/testwochen



GEOENGINEERING

Was kostet die Welt?

von Lars Fischer

Eine neue Studie kommt zu dem Schluss: Den Klimawandel mit Schwefelteilchen in der Atmosphäre zu bremsen, ist nicht nur technisch durchführbar, sondern sogar recht kostengünstig. Doch politisch ist das Thema ebenso komplex wie die Emissionsreduktion. Es drohen nationale Alleingänge.

www.spektrum.de/testwochen

Lesen Sie »Spektrum – Die Woche« viermal gratis!

Jetzt jeden Donnerstag

- Mit mehr als 30 Seiten News, Kommentaren, Analysen und Bildern aus der Forschung
- Im Abo nur 0,77 € pro Ausgabe
- Jederzeit kündbar

Testen Sie 4 Ausgaben GRATIS mit Ihrem Zugangskode:

K8CW8X1

Aktionszeitraum bis 31.12.2012

Spektrum DER WISSENSCHAFT DIE WOCHE

www.spektrum.de/testwochen

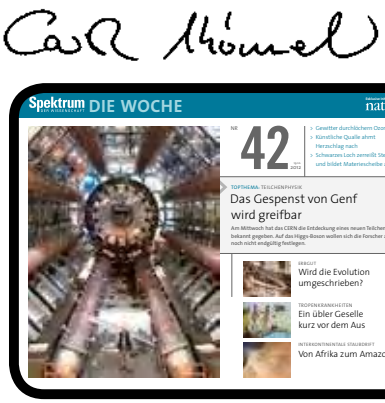
Carsten Könneker
Chefredakteur
koenneker@spektrum.com

Adipositas und Antibiotika

1734 Tonnen Antibiotika haben Pharmafirmen laut Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit 2011 an deutsche Tierärzte ausgegeben. Der überwiegende Teil dürfte in der Fleischproduktion gelandet sein. Eine weitere verstörende Zahl kommt aus Nordrhein-Westfalen: Einer Untersuchung des dortigen Verbraucherschutzministeriums zufolge wurden 96 Prozent aller Hähnchen in 182 überprüften Mastbetrieben mit Antibiotika aufgepäppelt. Die Gründe für eine derart flächendeckende medizinische Versorgung sind nicht nur die extremen Bedingungen der Massentierhaltung, unter denen sich Krankheiten rasend schnell ausbreiten können. Antibiotika steigern auch die Futterverwertung, sprich die Gewichtszunahme der Tiere. Zwar dürfen die Präparate seit 2006 nicht mehr zu diesem Zweck eingesetzt werden, doch die aktuellen Zahlen lassen vermuten, dass das Verbot mehr oder weniger umgangen wird. Die Folge: Riesige Mengen an Antibiotika gelangen in die Umwelt. Eine zu großzügige Verabreichung der Medikamente fördert dabei nicht nur die Bildung resistenter Bakterienstämme. Sie könnte auch zu einem weiteren brisanten Phänomen beitragen: Studien der letzten Jahre zeigen, dass viele der im menschlichen Körper lebenden Bakterien für die Erhaltung unserer Gesundheit notwendig sind. Die Ausmerzung dieser Mikroben bewirkt möglicherweise, dass sich Fettleibigkeit sowie Autoimmunerkrankungen immer stärker ausbreiten (siehe S. 26).

Vor 15 Jahren, im Oktober 1997, startete die digitale Berichterstattung von »Spektrum der Wissenschaft«. Jenseits des Hefts informieren wir Sie heute auf **Spektrum.de** täglich durch Meldungen, aktuelle Hintergrundberichte, Kommentare, Interviews, Videos und vieles mehr. Seit 2004 erscheint außerdem das wöchentliche PDF-Magazin **Spektrum – Die Woche**, das erste deutsche Wochenmagazin über Wissenschaft. Zum 15-jährigen Jubiläum haben wir **Spektrum – Die Woche** nun grundlegend überarbeitet: mehr Analyse, neue Gestaltung, verbesserte Lesbarkeit. Erfahren Sie jeden Donnerstag, was aktuell ist in der Wissenschaft und wie Experten die Entwicklungen einordnen. Und dies mit dem Tiefgang, den Sie von »Spektrum der Wissenschaft« gewohnt sind. Ich lade Sie ein, unsere »Woche« fortan regelmäßig als aktuelle Ergänzung unserer Berichterstattung im gedruckten Heft zu lesen!

Herzlich Ihr



Spektrum – Die Woche ist Deutschlands erstes wöchentliches Wissenschaftsmagazin. Es erscheint digital im PDF-Format. Über Links gelangen Sie aus den einzelnen Artikeln direkt ins Internet, wo die »Spektrum«-Redaktion ergänzende Informationen, Videos sowie die Originalquellen der zu Grunde gelegten Studien für Sie zusammenstellt. Jede Ausgabe enthält außerdem einen ausgewählten Artikel aus der aktuellen **nature** – exklusiv auf Deutsch. Testen Sie die neue »Woche« über vier Ausgaben gratis (siehe unser Angebot auf der linken Seite)!

AUTOREN IN DIESEM HEFT

Die größten Dinosaurier faszinieren die Paläontologen **Kristina A. Curry Rogers** und **Michael D. D'Emic** seit vielen Jahren. Ihre Suche nach Fossilien von Titanosauriern und anderen Sauropoden führte sie in mehrere Erdteile (S. 34).

Nicht nur Konkurrenz und Egoismus, sondern auch Kooperation hilft der Evolution auf die Sprünge, glaubt der Harvard-Biologe und Mathematiker **Martin A. Nowak** (S. 76).

Wie viel ist eine Staatsanleihe wert? Das ist neuerdings ein drängendes und überraschend kniffliges Problem. Der Mathematiker **Roland Stamm** beschäftigt sich damit, die mathematische Theorie der davonlaufenden Realität anzupassen (S. 94).

7 **Editorial**

10 **Leserbriefe/Impressum**

12 **Spektrogramm**
Doppelstern mit zwei Planeten • Frühe Einsamkeit verändert Hirnzellen • Kochendes Wasser – blasenfrei • Mutation lässt Pferde im Passgang laufen • Kunststoff tötet Bakterien • Aus Wärme wird Strom

15 **Bild des Monats**
Kein Überlebender in Sicht

16 **Forschung aktuell**

Vielfalt der Frühmenschen
Unsere Gattung bildete anfangs mehrere Arten.

Wandlungsfähige Bauten
Bewegliche Tragwerke ermöglichen Ultraleichtbau.

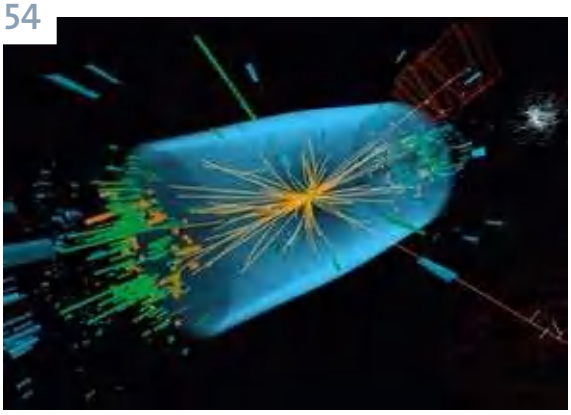
Das Immunproteasom
Die Molekülstruktur der Protein-Recyclingtonne für das Immunsystem konnte aufgeklärt werden.

Internationale Missionen
Öfter mal in der Krise: ESA-Raumfahrtprojekte.

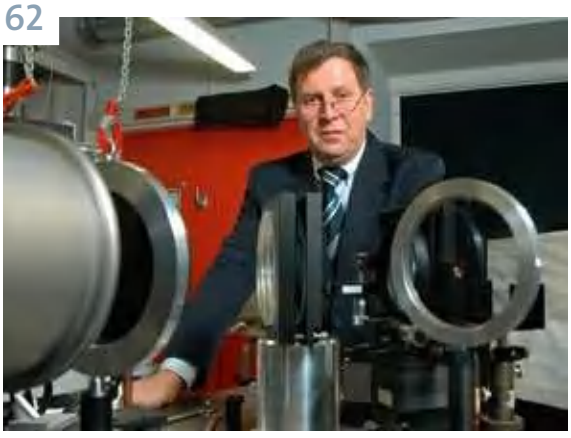
SPRINGERS EINWÜRFE
Schlaflos im Sexrausch
Manche Vögel bleiben in der Balz wochenlang wach.

34

54



62



BIOLOGIE & MEDIZIN

▸ 34 **Verkannte Giganten**
Kristina A. Curry Rogers und Michael D. D'Emic
Die Sauropoden waren die größten Landtiere aller Zeiten. Entgegen früherer Ansicht herrschten sie bis zum Ende der Dinosaurierzeit – in unerwarteter Vielfalt!

42 **Das geheimnisvolle Innenleben der Zellen**
Roberta Kwok
Unter dem Mikroskop gibt es noch einiges zu entdecken: In jüngster Zeit stießen Biologen auf eine Reihe neuer Strukturen, die ganz unterschiedliche Aufgaben erfüllen.

▸ 46 **Warten auf die Katastrophe**
Fred Guterl
Aus Vogelgrippeviren können offenbar jederzeit tödliche Erreger hervorgehen, die sich unter Menschen verbreiten. Experten rätseln, wie groß die Gefahr wirklich ist.

PHYSIK & ASTRONOMIE

54 **Der lange Weg zum Higgs**
Guido Tonelli, Sau Lan Wu und Michael Riordan
Drei der beteiligten Forscher schildern die entscheidenden Monate vor der Verkündung der Entdeckung des Higgs-Bosons – und riskieren einen Blick in die Zukunft.

INTERVIEW
▸ 62 **Urananreicherung mit Lasertechnik – billig und politisch hochbrisant**
Wolfgang Sandner warnt vor einer erleichterten Verbreitung von Nuklearwaffen durch die neue »Silex«-Technik.

SCHLICHTING!
74 **Warum wir in der Sauna überleben**
H. Joachim Schlichting
Schweiß kühlt. Doch wenn er in wahren Sturzbächen am Körper herabströmt, erhitzt sich dieser in Wahrheit.

26
▸ TITELTHEMA

Tausend Billionen Freunde

Jennifer Ackerman
Ist die in westlichen Ländern grassierende Fettleibigkeit auf vermehrte Antibiotikagaben für Babys zurückzuführen? Rühren die zunehmenden Autoimmunkrankheiten von einem Trend zu Kaiserschnittgeburten her? Auf solche Fragen stoßen Forscher, seit sie die unzähligen nützlichen Bakterien näher untersuchen, die so manche wichtige Körperfunktion erst ermöglichen.

86

94

MENSCH & KULTUR

76 **Warum sind wir hilfsbereit?**
Martin A. Nowak
Auch Kooperation treibt die Evolution voran.

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

82 **Von der Schipiste in den abstrakten Wahrscheinlichkeitsraum**
Marc Dressler
Der große Mathematiker Andrei N. Kolmogorow.

ERDE & UMWELT

86 **Eisschmelze am Südpol**
Douglas Fox
Angesichts kollabierender Eisschelfe in der Antarktis fragt sich: Steigt der Meeresspiegel viel schneller als erwartet?

TECHNIK & COMPUTER

▸ 94 **Finanzmathematik nach der Krise**
Roland Stamm
Da auch große Banken pleitegehen können, müssen Theorie und Algorithmen neu konzipiert werden.

104 **Rezensionen**
D. Graeber: Schulden • *A. Weisman:* Gaviotas • *U. Herb (Hg.):* Open Initiatives • *K. Adam:* Kampf gegen die Natur • *W. Gruber et al.:* Gedankenlesen durch Schneckenstreicheln • *B. Kast:* Ich weiß nicht, was ich wollen soll • *D. Templar, B. Leith:* Planet des Lebens (DVDs)

112 **Wissenschaft im Rückblick**
Von der frei stehenden Treppe zur fliegenden Untertasse

114 **Vorschau**

Titelmotiv: Bryan Christie [M]
Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▸ gekennzeichnet.

Feinheiten der Wellenfunktion

Markus Aspelmeyer und Markus Arndt diskutierten, ob quantenphysikalische Phänomene auch bei großen Massen auftreten. (»Schrödingers Katze auf dem Prüfstand«, Oktober 2012, S. 44)

Norbert Hinterberger, Hamburg: Der Teilchenbegriff ist vermutlich rein subjektiv – intersubjektiv zwar, aber eben subjektiv für den Teil der Welt, den wir klassisch sehen. H. Dieter Zeh hat dazu wiederholt in überzeugender Weise argumentiert. Der Welle-Teilchen-Dualismus scheint physisch diskret nicht vorhanden zu sein. Objektiv beziehungsweise physisch fundamental scheint nur die Welle zu sein. Unter Laborbedingungen (ohne Dekohärenz) lässt sich das ja auch deutlich zeigen, wie wir hier – insbesondere in dem kleinen Film – sehen. Das Molekül wird von den Experimentatoren selbst als Materiewellenüberlagerung beschrieben, sobald wir seine Welleninterferenzen auf dem Schirm sehen. Warum lassen wir es nicht dabei? Was uns an dieser Welle erscheint wie ein »Kollaps der Wellenfunktion« zu einem »Teilchen« an einem bestimmten Ort zu einer bestimmten Zeit im Fall einer Messung, ist einfach die inzwischen recht bekannte Tatsache, dass wir mit der Messung wie mit jeder beliebigen anderen Wechselwirkung auch das zu messende System stören oder zerstören beziehungsweise zur Dekohärenz bringen. Das heißt aber nicht, dass die Superposition »kollabiert«. Im Gegenteil: Sie ist jetzt in einer noch großräumigeren Verschränkung definiert.

Michael Engels, Krefeld: Im Artikel wird gesagt, dass die Schödinger-Gleichung linear ist, so dass nicht klar ist, warum keine makroskopischen Überlagerungszustände beobachtbar sind. Wenn man Teilchen als tatsächlich punktförmig annimmt, ist dies auch richtig. Wenn man aber die Wellenfunktion als tatsächliche Verteilung des Teilchens beziehungsweise der Teilchen mit allen seinen beziehungsweise ihren Eigenschaften wie zum Beispiel Ladung interpretiert, wird die Wellenfunktion mehrerer gekoppelter Teilchen nichtlinear. Bei der Berechnung von Quantensystemen mit interagierenden Teilchen (etwa des Heliumatoms) wird auch wirklich so gerechnet, als wären die Teilchen gemäß der Wellenfunktion verteilt. Dies wird allerdings so interpretiert, als gäbe es einen tatsächlichen Ort des Teilchens, den man aber nicht kennt. Daher rechnet man mit einer mittleren Teilchendichte, die sich aus der Wellenfunktion ergibt.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / DANIELA LEITNER

Schrödingers Katze hat ein langes Leben: Aktuell untersuchen Forscher, ob sich auch Makroteilchen wie Quantenobjekte verhalten.

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.)
Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser (Monatshefte), Dr. Gerhard Trageser (Sonderhefte)
Redaktion: Thilo Körkel, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online-Koordinator), Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke, Antje Findeklee (Bild des Monats); E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Editor-at-Large: Dr. Reinhard Breuer
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Referentin des Chefredakteurs: Kirsten Baumbusch
Redaktionsassistenz: Erika Eschwei
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax -751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114
Verlagsleiter: Richard Zinken
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Gerald Bosch, Dr. Markus Fischer, Dr. Susanne Lipps-Breda, Dr. Michael Springer.
Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com

Vertrieb und Abonnementverwaltung:
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner des Nationalen Instituts für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik). Das NaWik ist ein Institut der Klaus Tschira Stiftung gGmbH und des Karlsruher Instituts für Technologie. Wissenschaftlicher Direktor des NaWik ist Spektrum-Chefredakteur Dr. Carsten Könneker.

Bezugspreise: Einzelheft € 7,90 (D/A) / € 8,50 (L) /sFr. 14,–; im Abonnement € 84,– für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. E-Paper € 60,– im Jahresabonnement (Vollpreis); € 48,– ermäßigter Preis auf Nachweis. Zahlung sofort nach Rechungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70).
Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e.V. erhalten SdW zum Vorzugspreis.

Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Bereichsleitung Anzeigen: Marianne Dölz; Anzeigenleitung: Patrick Priesmann, Tel. 0211 887-2315, Fax 0211 887 97-2315; verantwortlich für Anzeigen: Christian Herp, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887 2481, Fax 0211 887-2686
Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 33 vom 01.01. 2012.
Gesamtherstellung: L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH.

Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2012 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
75 Varick Street, New York, NY 10013-1917
Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven Inchcoombe, Vice President, Operations and Administration: Frances Newburg, Vice President, Finance, and Business Development: Michael Florek, Managing Director, Consumer Marketing: Christian Dorbandt, Vice President and Publisher: Bruce Brandfon

Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

Gentechnik versus Mutagenese

Im Kampf gegen das Denguefieber versuchen Forscher, Stechmücken durch genetische Manipulation zu dezimieren, berichtete die Molekularbiologin Bijal Trivedi. (»Moskitos mit Selbstmordgen«, August 2012, S. 34)

Dietrich H. Nies, Halle: Schöner Artikel, allerdings gab es 1969 (WHO, Indien) noch keine Gentechnik. Vermutlich wurden die Mücken mit mutagenen Agenzien behandelt, was kein Verfahren ist, das per se genetisch veränderte Organismen erzeugt. Beides sollte nicht vermengt werden, zumal schwer zu verstehen ist, warum die unkontrollierte Veränderung von Hunderten von Genen durch mutagene Agenzien bei Züchtungen »gut« und »biologisch« sein soll, die gezielte, kontrollierte Veränderung eines Gens aber »böse, böse Gentechnik«.

Problematische Bohrungen

Der Geowissenschaftler Karl Urban stellte neue Techniken vor, mit denen sich auch in unseren Breiten die Wärme des Erdinnern anzapfen lässt. (»Energie aus der Tiefe«, September 2012, S. 72)

Klaus Gims, Holzkirchen: Die oberflächennahe Geothermie mittels Erdwärmebohrungen ist in Deutschland problematisch. Grund ist eine bei nicht wenigen Bohrunternehmen anzutreffende ausgeprägte Betrugsmentalität. Betrogen wird bei der »Verpressung« genannten Abdichtung des Bohrkanals. Diese soll neben einer besseren Wärmeübertragung auch das Übertreten von Wasser in andere geologische Formationen verhindern, falls ein Grundwasserstockwerk angebohrt wird. Ob damit der Vorfall in Staufen hätte verhindert werden können, entzieht sich meiner Kenntnis. In jedem Fall führt eine unzureichende Verpressung zu einer Effizienzminderung bei der Wärmepumpe und macht das Vorhaben dadurch oft unwirtschaftlich. Je nach geologischen Verhältnissen ergibt sich für das Bohrunternehmen durch den Betrug eine Kostenersparnis bis zur Hälfte des Auftragswerts. Nachdem ich große Unterschiede in der Verpressung verschiedener Bohrunternehmen auf dem gleichen Grundstück festgestellt hatte, habe ich einige Erdwärmebohrungen beobachtet. Dabei konnte ich kein weiteres Bohrunternehmen mehr finden, das von sich aus und ohne Reklamation eine fachgerechte Verpressung ausgeführt hätte. Dennoch waren alle diese Firmen nach W120 für solche Erdwärmebohrungen zertifiziert.

Virtuelle Teilchen

Mit der Unitaritätsmethode können die Physiker Zvi Bern, Lance Dixon und David Kosover selbst heftige Kollisionen im Teilchenbeschleuniger LHC beschreiben. (»Mit einem Rechentrick zur umfassenden Theorie der Naturkräfte«, September 2012, S. 38)

Florian König, Münster: In dem Artikel wird der Eindruck erweckt, dass virtuelle Teilchen nur in Feynman-Diagrammen mit Schleifen auftreten. Das ist falsch. Bereits die inneren Linien in Feynman-Diagrammen auf Baumgraphenniveau können virtuelle Teilchen darstellen. So erfüllt zum Beispiel das innere d-Quark in dem auf S. 41 gezeigten Diagramm (bei Abstrahlung eines Gluons endlicher Energie) nicht mehr die relativistische Energie-Impuls-Beziehung für ein d-Quark, ist also virtuell. Schade übrigens, dass nicht ein wenig detaillierter darauf eingegangen wurde, was denn nun die Unitaritätsmethode ausmacht.

Erinnert an Frankenstein

Der Neurowissenschaftler Henry Markram möchte mit der virtuellen Simulation des Gehirns unser Denkorgan besser verstehen. (»Auf dem Weg zum künstlichen Gehirn«, September 2012, S. 82)

Ernst Hammann, München: Das Ganze erinnert mich ein bisschen an Frankenstein, aber davon haben sich Menschen ja noch nie aufhalten lassen, im Gegenteil. Das Projekt könnte aber an einer ganz anderen Klippe zerschellen. Was, wenn das simulierte Gehirn erwacht und ein Bewusstsein und eine Persönlichkeit entwickelt? Dann ist es wohl als Mensch anzusehen (zumindest werden die üblichen gesellschaftlichen Querulantengruppen das lautstark fordern). Als Mensch hat es dann alle Menschenrechte, und man darf es nie mehr abschalten oder daran herumexperimentieren. An dieser Stelle endet dann unser Gottspielen.

Erratum

»Prionen bei Pilzen«, Forschung aktuell, Oktober 2012, S. 17

In der Grafik auf S. 18 ist uns ein Fehler unterlaufen: Es muss statt »DNA-Strang« »Boten-RNA-Strang« heißen.

FOLGEN SIE UNS IM INTERNET

facebook
www.spektrum.de/facebook

YouTube
www.spektrum.de/youtube

studiVZ
www.spektrum.de/studivz

twitter
www.spektrum.de/twitter

BRIEFE AN DIE REDAKTION

... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf www.spektrum.de/leserbriefe

Spektrum der Wissenschaft
Leserbriefe / Sigrid Spies
Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

Die vollständigen Leserbriefe und Antworten der Autoren finden Sie ebenfalls unter: www.spektrum.de/leserbriefe

ASTRONOMIE

Erster Doppelstern mit zwei Planeten

Astronomen um Jerome Orosz von der San Diego State University (USA) haben erstmals einen Doppelstern entdeckt, den zwei Planeten umrunden. Sie werteten Daten des amerikanischen Weltraumteleskops Kepler aus, das auf eine Himmelsregion im Sternbild Schwan gerichtet ist, um dort extrasolare Planeten aufzuspüren. Der Fund beweist, dass selbst in der Umgebung von kreisenden Sternpaaren, in der die Gravitationskräfte ständig schwanken, mehrere Begleiter entstehen und überdauern können.

Um Exoplaneten zu erspähen, nutzt Kepler die Transitmethode – es registriert also die periodischen Helligkeitsänderungen, die entstehen, wenn der Planet immer wieder vor seinem Mutterstern vorüberzieht und diesen verdunkelt. Das funktioniert allerdings nur bei Himmelskörpern, die mit ihrem Stern und dem Teleskop regelmäßig in einer Linie stehen. Diese Voraussetzung ist beim Sternsystem Kepler-47 gegeben, das von der Erde etwa 4900 Lichtjahre entfernt ist.

NASA / JPL / CALTECH-TIM PYLE

Das Sternsystem Kepler-47 enthält zwei Sonnen (unten in der Illustration) und zwei Planeten. Der äußere Planet (links, im Vordergrund) bewegt sich in der habitablen Zone.

Wie die Daten zeigen, besteht Kepler-47 aus einem Doppelstern mit zwei Begleitern. Die Sterne umrunden einander einmal in 7,45 Tagen. Der innere Planet benötigt etwa 50 Tage, um das Sternpaar einmal zu umlaufen, der äußere rund 300 Tage. Beide sind mit 3 beziehungsweise 4,6 Erddurchmessern deutlich größer als die Erde.

Der äußere Planet bewegt sich in der habitablen Zone – auf ihm könnte es also flüssiges Wasser geben, wenn er ein Gesteinsplanet wie die Erde wäre. Allerdings vermuten die Forscher, dass er ein Gasriese ist; jedoch könnte er große Monde haben.

Science 337, S. 1511–1514, 2012

Spektrum DER WISSENSCHAFT DIE WOCHE

Mehr aktuelle Analysen und Spektrogramme!

Lesen Sie in Spektrum DER WISSENSCHAFT DIE WOCHE

– Evolution: Wie das Einhorn zu seinem Horn kam
– Fernerkundung: Methusalem im All
– Tumoren: Kombipackung gegen den Krebs

www.spektrum.de/diewoche

Deutschlands erstes wissenschaftliches Wochenmagazin!

HIRNFORSCHUNG

Frühe Isolation verändert Zellen im Gehirn

Erleben Kinder keine Zuwendung, entwickeln sie schwere seelische und kognitive Störungen, die teils lebenslang anhalten. Nun haben Forscher an Mäusen beobachtet, dass soziale Isolation im frühen Alter die Reifung von Hirnzellen ausbremst.

Die Wissenschaftler um Gabriel Corfas von der Harvard Medical School trennten drei Wochen alte Mäuse von ihrer Gruppe. Mit sieben Wochen schnitten die Tiere in Verhaltenstests deutlich schlechter ab als Artgenossen, die in Gesellschaft aufgewachsen waren. Weitere zwei Wochen später untersuchte das Team die Gehirne der Nager. Dabei zeigten sich Veränderungen im präfrontalen Kortex, einer Region der Großhirnrinde, die für soziales Verhalten und kognitive Funktionen wichtig ist. Bei den isoliert gehaltenen Tieren waren dort bestimmte Gliazellen weniger ausgereift: Sie hatten kürzere Zellfortsätze und waren weniger verzweigt. Zudem statteten sie die Nervenfasern im präfrontalen Kortex mit dünneren Myelinscheiden aus. Diese Veränderungen bildeten sich auch dann nicht zurück, wenn die Tiere nach zwei Wochen Einsamkeit wieder zur Gruppe zurückkehrten. Bei Mäusen, die erst im Alter von fünf Wochen von den anderen getrennt wurden, zeigten sich keine solchen Veränderungen.

Die Myelinscheide beschleunigt die elektrische Signalübertragung in den Neuronen. Wenn sie dünner ist, beeinträchtigt das vermutlich die Informationsverarbeitung im Gehirn. Hier könnte ein Grund für das gestörte Verhalten der Tiere liegen. Vorangegangene Studien hatten bereits Hinweise in diese Richtung ergeben.

Science 337, S. 1357–1360, 2012

PHYSIK

Kochendes Wasser – völlig blasenfrei

Auf einer heißen, rauen und nicht benetzbaren Oberfläche siedet Wasser, ohne Blasen zu bilden. Das haben Forscher um Ivan Vakarelski von der King Abdullah University of Science and Technology in Saudi-Arabien beobachtet. Der Effekt lässt sich möglicherweise für verschiedene Anwendungen nutzen – etwa, um Dampfexplosionen in Kernkraftwerken zu verhindern.

Eine Flüssigkeit, die auf einer erhitzten Oberfläche siedet, wechselt oberhalb bestimmter Temperaturen vom Bläschensieden – dem aus dem Alltag bekannten Brodeln kochenden Wassers – zum so genannten Leidenfrost-Regime, bei dem eine stabile, wärmeisolierende Dampfschicht die Oberfläche von der Flüssigkeit trennt. Diese Situation lässt sich etwa beobachten, wenn Wasser auf eine heiße Herdplatte spritzt; die Tropfen zischen dann auf einem Dampfpolster umher. Wie das Team um Vakarelski feststellte, hängt die Temperatur, bei der die eine Art des Siedens in die andere übergeht, stark von der Benetzbarkeit der Kontaktfläche ab.

Auf glatten, Wasser abweisenden (hydrophoben) Oberflächen geht das Bläschensieden bereits bei deutlich niedrigeren Temperaturen ins Leidenfrost-Regime über. Auf superhydrophoben Flächen, die im Nanometermaßstab rau sind, bleibt das Bläschensieden schließlich ganz aus: Hier entsteht die stabile Dampfschicht bei allen Temperaturen oberhalb des Siedepunkts. In einer früheren Arbeit hatte Vakarelski bereits gezeigt, dass diese Schicht den Strömungswiderstand eines Körpers in Wasser um etwa 85 Prozent reduzieren kann.

Nature 489, S. 274–277, 2012

VAKARELSKI, I.U. ET AL., NATURE 489, S. 274–277, 2012, FIG. 1 B+C

Kugeln mit superhydrophober Oberfläche erzeugen beim Eintauchen tiefe Krater im Wasser (links). Nach völligem Untertauchen sind sie von einer dünnen Gasschicht umgeben (rechts).

GENETIK

Mutation lässt Pferde im Passgang laufen

Eine einzige genetische Mutation ermöglicht Pferden, im so genannten Passgang zu laufen, bei dem die Beine der linken beziehungsweise rechten Körperhälfte gemeinsam nach vorn schwingen. Das berichten Genetiker um Leif Andersson von der Universität Uppsala (Schweden).

FREYJA IMSLAND, UPPSALA UNIVERSITET

Flink zu Huf, und elegant noch dazu: Ein Islandpferd im schnellen Passgang.

Normalerweise beherrschen Pferde drei Gangarten: Schritt, Trab und Galopp. Einige Rassen sind noch zu weiteren in der Lage – etwa zum Tölt, einem schnellen Schritt, bei dem immer mindestens ein Fuß Bodenkontakt hat, oder eben zum Passgang. Bisher war man davon ausgegangen, dass diese exotischen Gangarten eine komplexe genetische Veranlagung erfordern. Nun haben die Forscher um Andersson als einzige Voraussetzung dafür eine Mutation im Gen *DMRT3* ausgemacht. Es kodiert für ein Protein, das an der Entwicklung von Rückenmarksneuronen beteiligt ist, welche die Bewegung der Gliedmaßen koordinieren. Infolge der Mutation ist das Protein um 174 Aminosäuren kürzer und ermöglicht die Bildung von Neuronen, die sowohl die Bewegung von Vorder- und Hinterhufen als auch den Wechsel zwischen beiden Körperseiten flexibler koordinieren.

Die Forscher hatten in ihrer Studie 70 Islandpferde untersucht. 40 Tiere, die Tölt und Passgang beherrschten, wiesen die Mutation reinerbig auf, also auf beiden Kopien des Gens. Von den Pferden hingegen, die nur den Tölt konnten, trug immerhin jedes dritte die Mutation in reinerbiger Form, wie weitere Untersuchungen zeigten. Die Forscher werten das als Hinweis darauf, dass die Mutation zwar notwendig für das Beherrschen des Passgangs ist, aber nicht hinreichend: Sie spiegele sich nur bei entsprechendem Training im Bewegungsrepertoire der Tiere.

Nature 488, S. 642–646, 2012

MEDIZINTECHNIK

Neuer Kunststoff tötet Bakterien

Einen antimikrobiellen Kunststoff nach dem Vorbild natürlicher Abwehrstoffe, mit denen Lebewesen eindringende Mikroben in Schach halten, haben Forscher um Gregory Tew von der University of Massachusetts hergestellt. Er tötet Bakterien effektiv ab und lässt sich etwa als Nahtmaterial zum Verschließen von Operationswunden einsetzen.

Der Kunststoff besteht aus den Substanzen Aminoethylmethacrylat und Butylmethacrylat. Seine Molekülstruktur enthält sowohl positiv geladene als auch fettlösliche Bereiche. Bakterien können auf diesem Material die Funktion ihrer Zellmembran nicht aufrechterhalten und sterben ab.

Bei Versuchen im Reagenzglas reduzierte der Kunststoff in einer Konzentration, die zehnfach über der minimal wirksamen Dosierung lag, die Zahl von *Staphylococcus-aureus*-Bakterien um mehr als den Faktor 1000. Wenn die Forscher ihn mit gängigen Nahtmaterialien mischten, genügte ein Zusatz von 0,5 Gewichtsprozent, um eine antimikrobielle Oberfläche herzustellen, die alle aufgesprühten *Staphylococcus-aureus*-Zellen abtötete. Außer gegen grampositive Bakterien wie *S. aureus* wirkt das Material auch gegen gramnegative Arten wie *Escherichia coli*, das im menschlichen Darm vorkommt.

Langmuir 28, S. 12134–12139, 2012

ONDERWIJSGEK / CC-BY-SA-2.5

In OP-Wunden dringen häufig Keime ein. Mikroben abtötendes Nahtmaterial könnte dazu beitragen, solche Infektionen zu verhindern.

TECHNOLOGIE

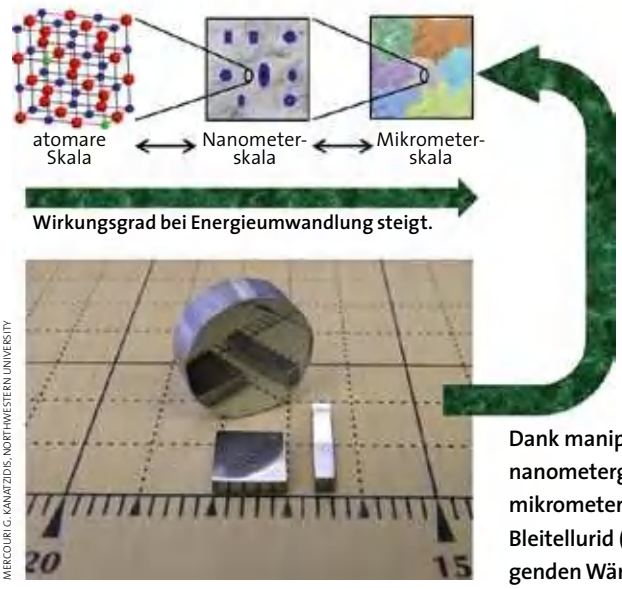
Aus Wärme wird Strom

In technischen Geräten geht die eingespeiste Energie oft überwiegend als Abwärme verloren. Thermoelektrische Materialien können diese zum Teil wieder nutzbar machen, indem sie Temperaturdifferenzen in elektrische Energie umwandeln. Bislang haben sie jedoch einen schlechten Wirkungsgrad. Kanishka Biswas von der Northwestern University in Evanston (USA) und seine Kollegen präsentieren nun einen thermoelektrischen Werkstoff, der deutlich effizienter arbeitet als frühere Materialien.

Die Forscher gingen von dem Halbleiter Bleitellurid aus, der bereits als Wärme-Strom-Wandler eingesetzt wird. Um dessen Wirkungsgrad zu erhöhen, veränderten sie seine innere Struktur auf drei verschiedenen Ebenen. Sie dotierten ihn mit Natrium und manipulierten so sein Atomgitter; sie sorgten dafür, dass sich in seinem Innern nanometergroße Kristalle aus Strontiumtellurid bildeten; und sie verarbeiteten das so gewonnene Material zu mikrometergroßen Körnchen, die sie in einem Sinterprozess zusammenbackten. Mit diesen Maßnahmen erreichten sie, dass der Werkstoff Gitterschwingungen außergewöhnlich effektiv streut, wodurch er Wärme besonders schlecht leitet. Das verleiht ihm einen Rekordwirkungsgrad: Bei Temperaturunterschieden um 600 Grad Celsius könne er bis zu 20 Prozent der Abwärme in elektrische Energie umwandeln, schreiben die Forscher.

Möglicherweise führt diese Entwicklung zu einem vermehrten Einsatz von Wärme-Strom-Wandlern. Sie könnten überall dort nützliche Dienste leisten, wo viel Abwärme entsteht, etwa in Autos, auf Schiffen oder in Kraftwerken.

Nature 489, S. 414–418, 2012



MERCOURI G. KANATZIDIS, NORTHWESTERN UNIVERSITY

Dank manipuliertem Atomgitter, nanometergroßen Einschlüssen und mikrometergroßer Körnung wird Bleitellurid (unten) zum überragenden Wärme-Strom-Wandler.

KEIN ÜBERLEBENDER IN SICHT

RÖNTGEN: NASA / CXC / RUTGERS / G. CASSAM-CHENAÏ, J. HUGHES ET AL.; RADIO: NRAO / AUI / NSF / GBT / VLA / DYER, MADDALENA & CORNWELL; OPTISCH: MIDDLEBURY COLLEGE / F. WINKLER, NOAO / AURA / NSF / CTIO SCHMIDT & DSS

Zu einer Supernova vom Typ Ia kommt es, wenn die Masse eines Weißen Zwergs durch Materiezufuhr von einem anderen Stern einen bestimmten Wert überschreitet. Lange Zeit hielten Forscher vor allem größere Himmelskörper, etwa Rote Riesen, für die Lieferanten. Inzwischen mehren sich aber Hinweise, dass solche Supernovae auch aus der Verschmelzung von zwei Weißen Zwergen hervorgehen, die beide bei der Explosion zerstört werden. So entstand die Supernova SN 1006, die im Jahr 1006 am Himmel erstrahlte, wohl aus einem Doppelsystem von Weißen Zwergen. Denn Forscher des Instituto de Astrofísica de Canarias entdeckten in der Umgebung des Schauplatzes trotz intensiver Suche keinen ehemaligen Begleiter. Ein größerer Beteiligter hätte jedoch »überlebt« und wäre in Teleskopen sichtbar. Nach neuen Schätzungen könnten bis zu 80 Prozent der Supernovae vom Typ Ia auf Doppelsysteme von Weißen Zwergen zurückgehen.

Nature 489, S. 533–536, 2012

PALÄOANTHROPOLOGIE

Verwirrende Vielfalt von Frühmenschen

Schon länger vermuteten Forscher, dass in der Frühzeit unserer Gattung mindestens zwei Menschenarten gleichzeitig lebten. Neue Hominidenfossilien aus Kenia erhärten nun diese These.

VON BERNARD WOOD

Für Paläoanthropologen beginnt die menschliche Evolutionsgeschichte lange vor dem Auftritt vom *Homo sapiens* beim letzten gemeinsamen Vorfahren mit Schimpansen und Bonobos. Mit jenem fernen Urahn verbindet uns eine lückenlose Folge von Arten, die schließlich zur Gattung *Homo* und weiter zum *Homo sapiens* führte. Über die Anfangszeit unserer Gattung wissen Forscher allerdings noch recht wenig. Vielleicht gab es damals tatsächlich nur eine einzige Evolutionslinie, sozusagen einen unverzweigten Ast am Stammbaum. Genauso wären jedoch mehrere Linien nebeneinander vorstellbar, also mehrere frühe *Homo*-Arten gleichzeitig, und die anderen Zweige sind irgendwann abgestorben. Überzeugende Belege für diese zweite Möglichkeit entdeckte nun ein Wissenschaftlerteam um die Anthropologin Meave G. Leakey vom Turkana Basin Institute in Nairobi anhand neuerer Fossilien aus Nordkenia, und zwar von Koobi Fora am Ostufer des Turkanasees. Demnach existierten offenbar schon ganz früh, vor zwei Millionen Jahren, wenigstens zwei unterschiedliche Linien der Gattung *Homo (Nature 488, S. 201, 2012)*.

In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts galt *Homo erectus* als der ursprünglichste Vertreter unserer Gattung. Von ihm gab es damals vor allem Fossilien aus China und Südostasien. Diese Frühmenschen besaßen einen kleinen Kopf und ausgeprägte Überaugenwülste. Den wenigen Skelettfunden zufolge standen und gingen sie anscheinend aufrecht, und das bereits recht ähnlich wie moderne Menschen.

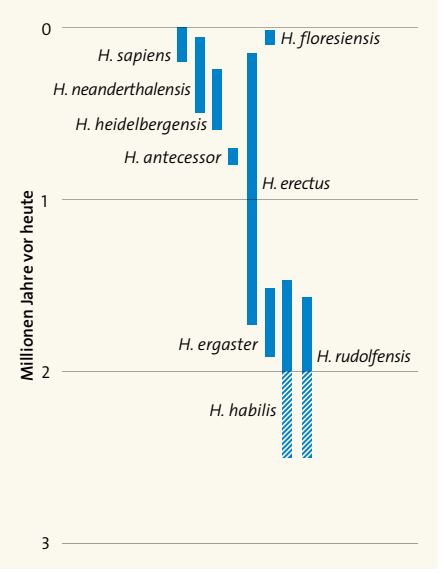
Aber dann kamen um 1960 in Tansania in der Olduvai-Schlucht Fossilien zu Tage, die den Paläontologen Louis Leakey und seine Kollegen 1964 veranlassten, in den Stammbaum am Beginn des Menschenastes eine weitere, noch primitivere Art einzufügen. Diese Spezies nannten sie *Homo habilis*, in der Annahme, dieser »geschickte Mensch« habe die einfachen Steinwerkzeuge gefertigt, die sich in Olduvai in den gleichen Sedimentschichten fanden wie jene Fossilien. Er hatte ein noch kleineres Gehirn als *Homo erectus*, und im Skelettbau erinnerte er etwas mehr an Menschenaffen. Später entdeckten Forscher auch in Koobi Fora versteinerte Knochen, die anscheinend ebenfalls von *Homo habilis* stammten. Allerdings stießen sie dort außerdem auf Schädelfossilien von offenbar sehr frühen Vertretern der Gattung *Homo*, die denen von Olduvai nicht so recht ähnelten.

In dieser Situation wurde ich Ende der 1970er Jahre damit betraut, eine sinnvolle Ordnung in die frühen *Homo*-Fossilien von Koobi Fora zu bringen, die unter anderem Schädelkalotten, Gesichtsschädel, Unterkiefer und Zähne umfassten. Zwar zeugten auch die Olduvai-Fossilien von einer ziemlich großen Variationsbreite, doch hatten in ihrem Fall Forscher gute Argumente dafür, dass sie alle zu derselben Art, besagtem *Homo habilis*, gehörten. Nur – galt Gleiches für die Koobi-Fora-Fossilien? Anders gesagt: Ließen sich die beiden Menschenformen, die es dort in der Frühzeit offensichtlich gegeben hatte, schlicht den beiden Geschlechtern zuordnen? Handelte es sich somit einfach um männliche und weibliche Vertreter ein und derselben Art?

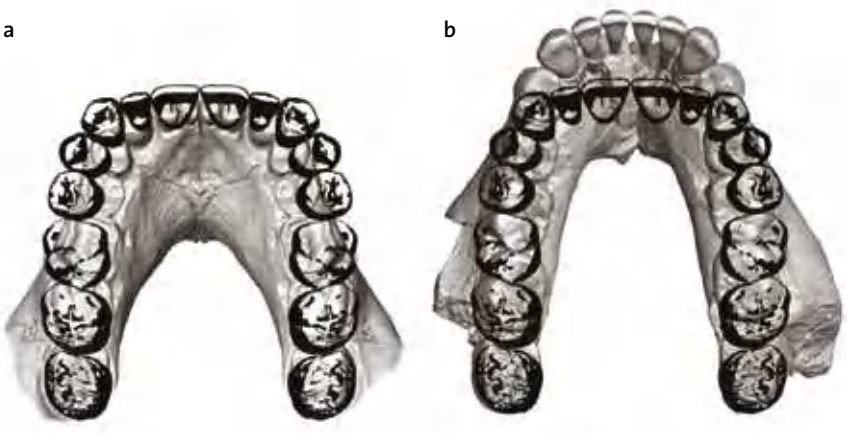
Bei näherer Betrachtung erschien dies wenig plausibel. Denn zwar ließen sich für Koobi Fora durchaus zwei Versionen von Gesichtsschädeln ausmachen, aber man konnte nicht einfach wie gewohnt die größere Sorte männlichen Individuen zusprechen und die kleinere weiblichen. Die beiden Formen unterschieden sich nämlich in einer

Wird der Menschenstammbaum noch komplexer?

Die Gattung *Homo* dürfte vor zwei bis drei Millionen Jahren entstanden sein. Jedoch gibt es zur Anfangsphase dieser Evolution (gestrichelte Balken) nur sehr wenige Fossilien. Neue Funde sprechen für mindestens zwei Evolutionslinien in früher Zeit, denen *Homo habilis* und *Homo rudolfensis* zugeordnet werden. Ob aus einer davon *Homo erectus* hervorging, ist noch unsicher.



WOOD, B.: FACING UP TO COMPLEXITY. IN: NATURE 488, S. 162–163, 2012, FIG. 1



LEAKEY, M. G. ET AL.: NEW FOSSILS FROM KOOBI FORA IN NORTHERN KENYA CONFIRM TAXONOMIC DIVERSITY IN EARLY HOMO. IN: NATURE 488, S. 201–204, 2012, FIG. 3

Der neue Oberkiefer aus Koobi Fora (mit der Katalognummer KNM-ER 62000, hier rekonstruiert und schwarz konturiert) würde auf den neuen Unterkiefer (KNM-ER 60000, heller gezeichnet) passen (a), nicht aber auf einen früher gefundenen Unterkiefer von Koobi Fora (b; KNM-ER 1802). Diese beiden Fossilien gehören deshalb wahrscheinlich nicht zur selben Art.

Weise, wie wir sie als Geschlechtsunterschiede weder von heutigen Menschenaffen noch vom modernen Menschen kennen. Als einzigen Ausweg sahen die Forscher, neben *Homo habilis* eine zweite frühe Menschenart zu deklarieren: den *Homo rudolfensis*.

Diese Schlussfolgerung war in der Paläoanthropologie allerdings immer umstritten. Nie hatten sich vom selben Individuum von *Homo rudolfensis* zugleich der Gesichtsschädel, womit Anthropologen die Partie ab dem Oberkiefer meinen, und der Unterkiefer gefunden. Und das Typusexemplar – so heißt das Fossil, an dem eine neue Spezies erstmals beschrieben wird – umfasste im Fall von *Homo habilis* keine Gesichtsteile, sondern nur einen Unterkiefer mit Zähnen, und im Fall von *Homo rudolfensis* nur das Gesicht mit Oberkiefer, doch weder Zähne darin noch den Unterkiefer. Die beiden Typusexemplare sind als OH 7 und KNM-ER 1470 katalogisiert, wobei Ersteres für Olduvai-Hominide steht, Letzteres für Kenia National Museum East (Ost) Rudolf.

Mein Vorschlag lautete damals: Zu dem grobknochigen Gesicht von *Homo rudolfensis* müsste ein kräftiger Unterkiefer mit großen Backenzähnen passen. Entsprechende Fossilien schrieb ich deswegen *Homo rudolfensis* zu, darunter einen als KNM-ER 1802 geführten Kiefer von Koobi Fora.

Die neue Studie stützt nun die Annahme, dass sehr früh mehrere Arten der Gattung *Homo* lebten. Zugleich widerlegt sie aber meine damalige These, wonach beispielsweise der Unterkiefer KNM-ER 1802 zum Gesicht KNM-ER 1470 passe. Bei den neuen Fossilien von Koobi Fora handelt es sich um einen ziemlich gut erhaltenen Gesichtsschädel, einen gut erhaltenen Unterkiefer und ein Unterkieferfragment (als KNM-ER 62000, KNM-ER 60000 und KNM-ER 62003 katalogisiert). Alle drei Fossilien sind etwas jünger als das Typusexemplar von *Homo rudolfensis*, dessen Alter annähernd zwei Millionen Jahre beträgt. Der Gesichtsschädel und das kleine Kieferfragment sind zwischen 1,90 und 1,95 Millionen Jahre alt und der vollständige Kiefer sogar nur rund 1,83 Millionen Jahre.

Sprechende Gesichtsformen

Das neue Gesichtsfossil stammt von einem älteren jugendlichen Individuum. Obwohl dessen Gesicht kleiner war als das von KNM-ER 1470, stimmt die Form überein: Bei beiden stoßen die Wangenknochen ziemlich weit vorn zum knöchernen Gaumen. Das neue Fossil weist – anders als KNM-ER 1470 – einige Zähne auf. Die Backenzähne beschreiben die Forscher als mäßig groß mit relativ breiten Kronen. Der Gaumen ist auffällig kurz. Die Zahnreihe macht beim ersten Vorbackenzahn einen fast rechten Winkel, und vordere wie auch hintere Zähne stehen jeweils in ziemlich geraden Reihen. Bei *Homo habilis* hingegen bilden diese Partien eher Bögen mit einem runderen Übergang und dem Eckzahn an der Biegung. Zu dem neuen Gesichtsfossil wie auch zu KNM-ER 1470 passen beide neuen Unterkiefer viel besser als die damals von mir vorgeschlagenen Fundstücke. Das untermauert die Annahme mehrerer verschiedener *Homo*-Arten zu dieser Zeit.

Was also bedeutet dieser Befund für die zukünftige Forschung? Notwendig sind nun unter anderem mehr Untersuchungen an modernen Menschen und Menschenaffen dazu, wie stark die Form von Gaumen und Unterkiefer zwischen Individuen derselben Art abweichen kann. Zudem müsste man ein Verfahren entwickeln, mit dem sich anhand fester Kriterien abschätzen lässt, mit welcher Wahrscheinlichkeit der Unterkiefer OH 7 zur selben Spezies gehört wie der Kiefer KNM-ER 60000 oder der Kiefer KNM-ER 1802 – oder eben nicht.

Sollte sich das letztgenannte Fossil dann *Homo habilis* zuordnen lassen, wäre ich zwar überrascht, aber es bliebe bei den zwei frühen *Homo*-Arten. Sollte es sich dort allerdings nicht einfügen, was ich eher annehme, könnten dieser Unterkiefer und ein paar andere Fossilien sogar noch eine dritte Art repräsentieren.

Schließlich sei noch erwähnt, dass ich, wie einige Wissenschaftlerkollegen auch, den Gattungsbegriff *Homo* für die einem *Homo habilis* und einem *Homo rudolfensis* zugeordneten Fossilien für reichlich weit gefasst halte. Vielleicht gehörten diese beiden mutmaßlichen Spezies ja noch zu einem ganz anderen Stammbaumast als unsere Vorfahren.

Der Paläoanthropologe **Bernard Wood** arbeitet an der George Washington University in Washington D. C. am Center for the Advanced Study of Hominid Paleobiology.

© Nature Publishing Group

www.nature.com
Nature 488, S. 162–163, 9. August 2012

BAUINGENIEURWESEN

Das Dach der Zukunft

Anpassungsfähige Tragwerke erlauben es Ingenieuren, extrem leichte Bauwerke zu konstruieren.

VON MARTIN WEICKGENANNT UND STEFAN NEUHÄUSER

Maximal belastbar bei minimalem Materialeinsatz – so sollen Tragstrukturen für Bauwerke heute sein. Der so genannte Ultraleichtbau versucht, mit Hilfe von anpassungsfähigen Tragwerken die Grenzen des bisher Möglichen zu überschreiten. An der Universität Stuttgart entwickeln wir hierfür ein Schalentragwerk aus Holz, das bei einer Materialstärke von nur vier Zentimetern eine Fläche von zehn mal zehn Metern überspannt (siehe Bild rechts). Das ist deshalb möglich, weil die Konstruktion sich aktiv bewegt und erhöhte Materialbeanspruchungen gezielt kompensiert.

Gekrümmte Tragstrukturen haben den Vorteil, dass sie bei geringem Eigengewicht große Spannweiten erreichen, etwa in Brücken und Stadiondächern. Schon in der Antike setzten Ingenieure und Architekten deshalb auf bogenförmige Brücken und Gewölbekuppeln – man denke an römische Aquädukte oder das Pantheon. Die Geometrie der Konstruktion wird so ausgelegt, dass sie die dominierenden Lasten optimal abträgt. Bei traditionellen Bauwerken dominiert in der Regel das Eigengewicht, und die mechanischen Kräfte, die auf das Tragwerk wirken, sind weit gehend konstant und gleichmäßig verteilt.

Treten jedoch ungleichmäßig verteilte Lasten auf, beispielsweise durch Wind oder Schnee, kommt es zu stark variierenden Beanspruchungen des Bauwerks. Die Tragstruktur muss dann so konstruiert sein, dass sie auch den maximal zu erwartenden Kräften standhält. Solche Maximallasten treten aber, wenn überhaupt, nur extrem selten auf – vielleicht einmal in 50 Jahren. Das bedeutet, dass ein Großteil des Materials in heutigen Tragstrukturen nur wenig genutzt wird. An der Universität Stuttgart suchen wir deshalb nach Wegen, Tragwerke so auszulegen, dass sie im Vergleich zu herkömmlichen Konst-

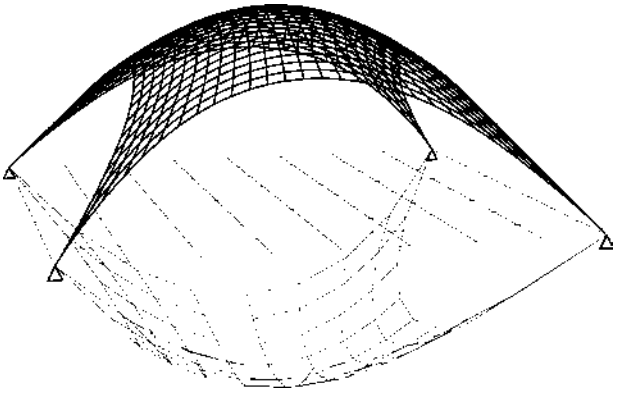
Formfindung

Die so genannte Formfindung dient im Leichtbau dazu, Geometrien für möglichst effiziente Tragstrukturen zu entwickeln. Für doppelt gekrümmte Schalentragwerke eignen sich vor allem Formen, die nur durch Druck beansprucht werden. Denn dann werden die Fasern des Materials gleichmäßig über die gesamte Dicke belastet – im Gegensatz zur Biegebeanspruchung, die die Fasern unterschiedlich stark fordert.

Eine Möglichkeit, solche Formen zu finden, sind Hängemodelle: Ein durchhängendes Seil oder Tuch bildet auf Grund seines Eigengewichts Geometrien mit reiner Zugbelastung aus. Kehrt man die Richtung der Schwerkraft um – beziehungsweise spiegelt man die Hängeform an der Horizontalen –, dann ergibt sich eine rein druckbeanspruchte Struktur. Eine veränderte Belastung des Seils führt automatisch zu einer angepassten Hängeform, das heißt, für jede Beanspruchung gibt es auch eine ideale Geometrie des Tragwerks.

Bis in die 1970er Jahre setzten Ingenieure vorwiegend physikalische Modelle zur Formfindung ein. Heute kann man die entsprechenden Vorgänge im Computer nachbilden, um zu effizienten Tragstrukturen per rechnergestützter Simulation zu gelangen.

BEIDE ABBILDUNGEN: ILEK



Ein hängendes Kettennetz verformt sich unter seinem Eigengewicht so, dass es nur durch Zug beansprucht wird (links). Die geometrische Spiegelung dieser Form (rechts) ergibt eine Tragstruktur, in der nur Druckkräfte wirken.

BOSCH REXROTH

Die experimentelle Dachkonstruktion Stuttgart SmartShell auf dem Campus der Universität Stuttgart: Drei der vier Auflagerpunkte lassen sich über hydraulische Zylinder bewegen. Das gestattet, die Struktur optimal an die aktuellen Belastungen anzupassen.

ruktionen deutlich weniger Ressourcen benötigen, aber trotzdem genauso belastbar sind.

Bereits vor 15 Jahren kam an Werner Sobeks Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK) die Idee auf, mit Hilfe adaptiver Tragwerke radikal Gewicht einzusparen. Diese reagieren aktiv auf wechselnde Lasten und passen so die Konstruktion flexibel an die aktuellen Verhältnisse an. Dadurch wirken sie Überbeanspruchungen entgegen und verhindern Schäden am Bauwerk.

Kein Aufschaukeln mehr

Im Zuge unserer Entwicklungsarbeiten gelang es, ein inhärentes Problem ultraleichter Strukturen zu lösen: Sie sind wegen ihrer geringen Masse äußerst schwingungsanfällig. In herkömmlichen Gebäuden klingen Vibrationen relativ schnell ab, da die große Masse des Baumaterials stark dämpfend wirkt. Bei ultraleichten Konstruktionen fehlt diese Masse jedoch, und die Schwingungen bleiben lange erhalten. Dadurch kommt es zu hohen Materialbelastungen und raschem Verschleiß. Im schlimmsten Fall führt eine dauerhafte Anregung zur Resonanz und zur Zerstörung des Bauwerks.

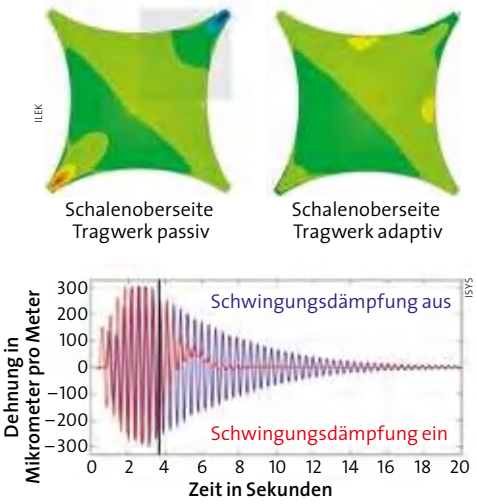
Um das zu verhindern, entwickeln wir am Institut für Systemdynamik (ISYS) von Oliver Sawodny Konzepte zur aktiven Schwingungsdämpfung. Dabei orientieren wir uns an Ideen, die im Bereich des Maschinenbaus seit Jahren erfolgreich eingesetzt werden. Sie gilt es ins Bauwesen zu übertragen.

Das Ergebnis unserer Arbeiten ist das eingangs beschriebene Tragwerk aus Holz, die Stuttgart SmartShell, wie wir sie nennen. Es handelt sich um das erste adaptive Schalentragwerk der Welt. Aus mehr als 3500 Holzleisten gefertigt und nur vier Zentimeter stark, wiegt es bei einer Spannweite von zehn Metern nur etwa 1,4 Tonnen. Traditionell gebaute Dächer dieser Größe müssten zwei- bis dreimal so dick (und schwer) sein, um die gleiche Belastbarkeit zu erreichen.

Die Struktur ist dabei nicht, wie sonst üblich, an allen Auflagestellen fest verankert. Vielmehr ruht sie an drei von vier Punkten auf Lagern, die über Hydraulikzylinder bewegt werden können. Hierdurch ist es möglich, die Schale gezielt zu verformen und dadurch den aktuellen Belastungen optimal anzupassen. Zudem können wir Schwingungen in der Konstruktion durch Gegenbewegungen der Lager aktiv dämpfen.

Wie funktioniert das Ganze im Detail? Ein komplexes Regelungssystem ermittelt den aktuellen Belastungs- und Schwingungszustand der Schale. Hierzu wertet es die Messwerte von hochgenauen Dehnungssensoren aus, die an der Schale angebracht sind und 200-mal pro Sekunde aktuelle Daten liefern. Anhand dieser Werte bestimmt das Regelungssystem, wie sich die Hydrauliklager bewegen müssen, um statische Lasten optimal auszugleichen und Schwingungen bestmöglich entgegenzuwirken. Anschließend verschiebt es die Auflagerpunkte entsprechend. Das geschieht mit einer Genauigkeit von zwei hundertstel Millimetern – ein menschliches Haar ist etwa fünfmal so dick – und einer Geschwindigkeit von bis zu 30 Zentimeter pro Sekunde.

Das System stützt sich auf Computersimulationen, die das statische Verhalten der Struktur bei beliebigen Außenbedingungen präzise vorausberechnen. Anhand der Simulationsergebnisse optimiert es die Verschiebungswege der Auflagerpunkte so, dass sich unter Belastung eine möglichst geringe Materialspannung einstellt. Auf diese Weise lassen sich kritische Verformungen und Überbeanspruchungen bereits im Computer erkennen und somit in der realen Konstruktion vermeiden. Ein wesentlicher Punkt unserer Arbeiten besteht darin, die Simulationsmodelle experimentell zu überprüfen. Eine hydraulisch angesteuerte Seilkonstruktion



Computersimulation der auftretenden Kräfte in der Schale, wenn im grau markierten Bereich eine Belastung von 400 Newton pro Quadratmeter einwirkt (oben). Durch Verschieben der Auflager kann das adaptive Tragwerk die Spannungsspitzen um etwa 70 Prozent reduzieren (oben rechts), verglichen mit einer passiven, nicht anpassungsfähigen Konstruktion (oben links). Auch Schwingungen in der Schale kann das adaptive Tragwerk dämpfen; es verkürzt deren Dauer um bis zu 80 Prozent (unten).

dient hierbei dazu, Kräfte auf verschiedene Punkte der Struktur auszuüben und in der Realität auftretende Belastungen nachzubilden.

Um auch die Schwingungen der Schale rechnergestützt zu dämpfen, haben wir die statischen Modelle erweitert, so dass diese das dynamische Verhalten der Konstruktion im Computer abbilden. Damit simulieren wir stoßförmige Belastungen der Schale und vergleichen sie dann mit den Ergebnissen entsprechender Experimente. Die Parameter des Modells variieren wir dabei so lange, bis wir eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung erreichen.

Zusammengenommen zeigen unsere Forschungsarbeiten, dass das adaptive Tragwerk der Stuttgart SmartShell die Maximalspannungen in der Schale bei statischer Belastung um bis zu 70 Prozent reduzieren kann. Die Auflagerpunkte verschieben sich hierbei um bis zu zehn Zentimeter, was einem Prozent der Spannweite des Dachs entspricht. Zudem konnten wir die Dauer auftretender Schwingungen um 80 Prozent reduzieren. Das erlaubt es, ein Aufschwingen der Struktur bei permanenter Anregung, etwa durch böigen Wind, wirkungsvoll zu verhindern und Ermüdungseffekten des Materials entgegenzuwirken.

Die Erfahrungen, die wir in Computersimulationen und Experimenten mit der Stuttgart SmartShell gemacht haben, deuten darauf hin, dass adaptive Tragwerke den Weg zu einer völlig neuen Bauweise ebnen. Sie ermöglichen eine drastische Materialeinsparung sowie deutlich weniger Materialermüdung und Schäden an der Struktur. Das schont Ressourcen und erhöht gleichzeitig die Leistungsfähigkeit tragender Konstruktionen.

Martin Weickgenannt und **Stefan Neuhäuser** sind wissenschaftliche Mitarbeiter an der Universität Stuttgart. Weickgenannt forscht am Institut für Systemdynamik (ISYS), Neuhäuser am Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK). Sie haben die Stuttgart SmartShell gemeinsam mit Kollegen und Steuerungsexperten von Bosch Rexroth entwickelt. www.smartshell-stuttgart.de

MOLEKULARMEDIZIN

Recyclingtonne für das Immunsystem – genauer betrachtet

Vom zelleigenen Schredder für Proteine, Proteasom genannt, besitzen Immunzellen eine Sonderausfertigung. Jetzt haben Forscher dessen Aufbau im Detail untersucht. Damit hoffen sie, Medikamente gegen Autoimmunkrankheiten zu entwickeln.

VON MICHAEL GROSS

Mit ihren Rohstoffen gehen Zellen sparsam um. Beispielsweise recyceln sie fehlerhafte und nicht mehr benötigte Proteine. Den zur Verschrottung vorgesehenen Molekülen hängen sie zunächst ein Etikett an, bestehend aus dem kleinen Protein Ubiquitin. Dann kommen sie in die Tonne – was ganz wörtlich zu nehmen ist: Die Maschine, die Proteine abbaut, sieht tatsächlich aus wie ein Fass. Es besteht aus vier Untereinheiten in Gestalt eines Rings mit jeweils sieben Proteinmolekülen. Dieses Fass stellt den Kern des so genannten Proteasoms dar (siehe »Reißwolf für Proteine«, SdW 5/2001, S. 54, und »Nobelpreis für Chemie« SdW 12/2004, S. 14).

Der Abbau von zelleigenen Molekülen muss unbedingt strengstens reguliert werden, damit hierdurch kein Schaden entstehen kann. Im Inneren der Zellen werden Proteine deswegen ausschließlich in Proteasomen verdaut; und nur wenn sie ein Ubiquitinschild tragen, erhalten sie Zutritt in die Recyclingtonne.

Am einfachsten sind die Proteasomen der so genannten Archaeen oder Archaebakterien gebaut. Bei ihnen weisen die vier Ringe der Kerneinheit nur zwei Arten von Untereinheiten auf: zum einen in den beiden mittleren Ringen so genannte β-Untereinheiten, welche die Proteine zerlegen – also katalytisch aktiv sind –, zum anderen in den äußeren Ringen α-Untereinheiten, die eher strukturellen Zwecken dienen.

Bereits bei der Bierhefe treten mehrere in ihrer Funktion verschiedene β-Untereinheiten auf, die ein Protein an jeweils unterschiedlichen Stellen zerschneiden. Noch größer ist die Vielfalt an Untereinheiten bei Säugetieren. Hier kennen Forscher sogar drei funktionell verschiedene Varianten von Proteasomen. Außer den »regulären«, so genannten konstitutiven Ausführungen gibt es eine spezialisierte Schreddersorte mit besonderen β-Untereinheiten, die ausschließlich in bestimmten Zellen des Immunsystems vorkommt und deswegen als Immunproteasom bezeichnet wird. (Eine dritte Variante, das t-Proteasom, findet sich in manchen Thymuszellen.)

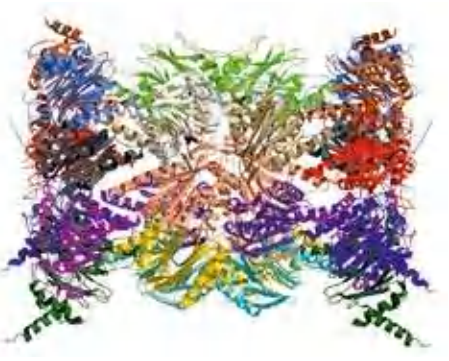
Ein eigenes Immunproteasom wird offenbar benötigt, weil Immunzellen ihre Proteine nicht nur zwecks Wiederverwertung zerlegen, sondern auch, um anderen Immunzellen die Bruchstücke zu zeigen. Das ist ein wichtiger Aspekt der Fremdstofferkennung des Immunsystems, dank dem es im Normalfall zwischen »selbst« und »nichtselbst« unterscheidet. Fehler bei der Zuordnung dürfen nicht unterlaufen – andernfalls drohen beispielsweise Autoimmunkrankheiten wie etwa Diabetes Typ I, rheumatoide Arthritis oder multiple Sklerose, bei denen die Abwehr irrtümlich Moleküle des eigenen Körpers angreift.

Wie Mediziner erst vor einigen Jahren herausfanden, spielt das Immunproteasom generell bei Entzündungen eine entscheidende Rolle. Die überstarke Aktivität bei Autoimmunkrankheiten zeigt allerdings, dass es in dem Fall entgleist ist. Die Forscher hoffen nun auf spezifische Hemmstoffe, die gezielt nur diese Proteasomvariante außer Gefecht setzen – die also bei Autoimmunkrankheiten helfen würden, aber Zellen anderweitig nicht schaden. Allerdings war die genaue Struktur des Immunproteasoms bisher nicht bekannt, an die man solche Medikamente anpassen müsste.

Proteinkristalle durchleuchtet

Den Arbeitsgruppen von Michael Groll an der TU München und von Marcus Groettrup an der Universität Konstanz gelang es nun, den Molekülkomplex und vor allem auch den funktionellen Bereich im Innern mittels Röntgenkristallografie darzustellen. Das heißt, die Forscher konnten Immunproteasomen isolieren und daraus Kristalle bilden, die sie dann quasi durchleuchteten. Aus den Beugungsmustern ließ sich der Molekülaufbau berechnen. Um die Struktur des katalytischen Bereichs detailliert zu erfassen, verglichen sie drei verschiedene Proteasomen jeweils zusammen mit dem bisher einzigen bekannten selektiven Hemmstoff – PR957 – des Immunproteasoms und ohne ihn. Sie analysierten auf die Weise konstitutive und Immunproteasomen von Mäusen sowie Hefeproteasomen *(Cell 148, S. 727, 2012)*.

PR957 hemmt im Immunproteasom die Untereinheit β5i, die nur in diesem vorkommt. Wegen seiner Beschaffenheit eignet es sich allerdings nicht gut als Medikament. Wie sich nun zeigte, beruht die selektive Vorliebe dieses Inhibitors auf ganz subtilen Unterschie-



MARCUS GROETTRUP UND MICHAEL BASLER, UNIVERSITÄT KONSTANZ

Die Abbildung zeigt die Kristallstruktur des Immunproteasoms der Maus. In der Mitte sitzt das reaktive Zentrum, dessen Funktionsweise Forscher nun aufklärten.

Natur
Energie
Plus

Mit der Natur auf einer Welle.

In den letzten zwölf Monaten haben sich über 30.000 Bürger für Strom aus 100 % Wasserkraft von NaturEnergiePlus entschieden. Wann wechseln Sie zum Strom aus sauberer Quelle?

→ Jetzt wechseln!

www.naturenergieplus.de

den in der räumlichen Anordnung von β5i gegenüber der »Normalversion« der β5-Untereinheit.

In beiden Versionen befindet sich in der Bindungstasche, welche die zu verdauenden Proteine erkennt, die Aminosäure Methionin an derselben Stelle der Proteinsequenz. Nur ist sie im Immunproteasom gegenüber dem konstitutiven Proteasom auf Grund von Strukturunterschieden in der weiteren Umgebung ein wenig verdreht. Dadurch lässt sie in der Bindungstasche etwas mehr Platz. Hier können sich deswegen sperrigere Aminosäuren anlagern als sonst. Auch für PR957 ist dadurch genügend Raum, anders als beim konstitutiven Proteasom.

Bisher gibt es erst einen zugelassenen Wirkstoff, der sich aber gegen alle Proteasomen richtet und zur Behandlung des multiplen Myeloms, eines Knochenmarkkrebses, eingesetzt wird: Bortezomib (Handelsname: Velcade). Die Krebszellen mit ihrem besonders regen Stoffwechsel gehen dann leichter als normale Zellen zu Grunde, aber wegen der unspezifischen Wirkung können die Nebeneffekte beträchtlich sein. Jetzt, da die molekulare Struktur der Bindungstasche des Immunproteasoms bekannt ist, können Forscher gezielt spezifische Hemmstoffe nur für diesen Molekülkomplex entwickeln. Mit ihnen lässt sich genauer untersuchen, was an dieser Stelle bei Autoimmunkrankheiten falsch läuft. Und natürlich hoffen Mediziner auch auf neue Medikamente gegen solche Leiden – Wirkstoffe, bei denen nicht das Immunsystem insgesamt außer Gefecht gesetzt wird.

Michael Groß ist Biochemiker und freier Wissenschaftsjournalist in Oxford.

KOMMENTAR

Wie gelingen internationale Partnerschaften?

Der Erfolg länderübergreifender Raumfahrtmissionen hängt vor allem davon ab, ob alle Partner im Boot bleiben. David Southwood, bis vor Kurzem ESA-Direktor für Wissenschaft und robotische Exploration, zieht die Lehren aus den Krisen, mit denen die europäische Raumfahrt im letzten Jahr konfrontiert war.

VON DAVID SOUTHWOOD

Wissenschaftliche Kooperationen auf internationaler Ebene ermöglichen Erfolge, die auf andere Weise nicht zu erzielen wären. Dies bewies zuletzt die Entdeckung eines neuen Elementarteilchens, vermutlich das lange gesuchte Higgs-Boson, am europäischen Teilchenforschungszentrum CERN, dem mittlerweile 20 Mitgliedsländer angehören (siehe Artikel ab S. 54).

Zugleich stellt eine Zusammenarbeit über Ländergrenzen hinweg besondere Anforderungen. 2011, in meinem letzten Jahr als Direktor für Wissenschaft und robotische Exploration bei der Europäischen Weltraumbehörde (ESA), sah ich mich mit dem Wegfall von US-Geldern für zwei Gemeinschaftsprojekte konfrontiert: das James Webb Space Telescope (JWST) und eine Jupitermission. Meinen Nachfolger Alvaro Giménez traf es noch härter, als sich die USA auch aus dem Marsprogramm ExoMars verabschiedeten. Aus jedem dieser drei Ereignisse lassen sich Lehren für die Handhabung künftiger Projekte ziehen. Und obwohl es jedes Mal die USA waren, die sich zurückzogen, gelten diese Lehren ganz allgemein und werden an Bedeutung gewinnen, wenn große internationale Kooperationen an Zahl zunehmen und neue Partner wie China, Indien und Russland dabei eine Rolle spielen.

Es liegt in der Natur souveräner Regierungen, dass kaum eine Übereinkunft zur Kooperation in allen Bestandteilen rechtlich bindend ist. Für gewöhnlich leisten die Partner ihre Beiträge aus einem Gefühl der Solidarität heraus – wie etwa beim Hubble-Nachfolger JWST. Europa würde für das Infrarotteleskop zwei Messinstrumente sowie die Trägerrakete Ariane bereitstellen; die USA würden sich mit der Raumsonde, einem weiteren Instrument sowie dem auffaltbaren Teleskop beteiligen. Europas Komponenten stehen bereit, doch infolge von Finanzierungsengpässen und Verzögerungen auf US-Seite musste der Start von 2011 auf 2018 verschoben werden. Aus Kostengründen empfahl ein Komitee des US-Repräsentantenhauses im Juli 2011 sogar, das Projekt zu stoppen. Die Europäer hatten damals bereits über 100 Millionen Euro investiert. Nur dank Verhandlungen zwischen Weißem Haus, US-Kongress und NASA sowie diplomatischem und politischem Druck aus Europa blieb es schließlich verschont.

Im Fall der Jupitermission hingegen, aus der sich die USA im Februar 2011 zurückzogen, musste Europa das Vorhaben allein stemmen. Zum Glück hatte es bis zu diesem Zeitpunkt nur wenig investiert. Es schraubte seine Ziele zurück, und seit Mai 2012 steht fest: Der 850 Millionen Euro teure Jupiter Icy Moons Explorer (JUICE) soll an Europa

ESA

Als die USA aus der ExoMars-Mission ausstiegen, bei der auch ein Rover (Bild) zum Mars fliegen soll, wandte sich die ESA an Russland, um die Finanzierungslücke zu schließen.

und Callisto vorbeifliegen und 2030 in eine Umlaufbahn um Ganymed einschwenken. Die NASA trieb unterdessen 100 Millionen Dollar auf, um US-Forschern wenigstens eine gewisse Beteiligung zu sichern.

Bei ExoMars, das Europa eine Milliarde Euro kosten wird, sieht die Lage anders aus. Als sich die USA im Februar 2012 daraus zurückzogen, klaffte eine Finanzierungslücke von bis zu 250 Millionen Euro. Außerdem hatte Europa bereits mehr als 100 Millionen Euro investiert. Wegen bestehender Industrieverträge würde ein Projektabbruch bis zu 400 Millionen Euro kosten. Die Schuld an dem Schaden ist allerdings nicht allein bei den Amerikanern zu suchen. Diese waren erst 2009 zu dem ursprünglich rein europäischen Projekt gestoßen, um Hilfestellung zu leisten.

Die Bündelung von Ressourcen für ein großes Programm wie ExoMars ist ein zäher und schwieriger Prozess. Um sich weiterer Unterstützung bei teilnehmenden Staaten zu versichern, werden etwa die Missionsziele immer höher gesteckt. Dies machte ExoMars von Beginn an verwundbar: Es wuchs und wuchs und hörte auf, steuer- und finanzierbar zu sein. Umsichtige Manager wollten zwar Module streichen, damit das Projekt voranging. Doch stattdessen suchte die ESA nach neuen Partnern. Die USA und Russland lehnten ab, denn unter anderem war Europa noch durch Versprechen an das ursprüngliche Konsortium gebunden. Außerdem gab es kein gemeinsames Ziel, dem sich die potenziellen Partner hätten anschließen können.

Vorteile für beide Seiten

2008 übernahm ich das Programm von einem anderen Direktorat und nahm die Gespräche mit der NASA wieder auf. Amerikas langfristiges Ziel in der robotischen Marsforschung besteht darin, Bodenproben zur Erde zu bringen – eine so genannte Sample-Return-Mission. Gemeinsam mit meinem NASA-Amtskollegen Ed Weiler gelangte ich zu der Ansicht, dass sich eine Zusammenarbeit bei einem so teuren Vorhaben als unvermeidlich erweisen würde. Da schien es nur sinnvoll, sie so früh wie möglich zu beginnen. Der ExoMars-Plan wurde daraufhin so modifiziert, dass er gemeinsamen Zielen gerecht wurde. Beide Seiten profitierten davon: Das Projekt ExoMars konnte fortgeführt werden, und Europäer ebenso wie Amerikaner durften mit Bodenproben rechnen. Dass Letztere dann doch wieder aussteigen würden, sah niemand voraus.

Derartige Rückschläge ereignen sich zum Glück selten. Als sich die NASA vor 30 Jahren einer Finanzierungskrise gegenübersah, strich sie die geplante International Solar Polar Mission. Widerstrebend übernahm Europa die Führungsrolle bei einer abgespeckten Sonnenmission namens Ulysses, die überaus erfolgreich wurde. Sie kennzeichnete einen Wendepunkt: Es war die erste Mission, bei der Europa die Führung übernahm und Amerika nachfolgte. Auch bei der JUICE-Mission folgt die ESA diesem Vorbild: Sie verkleinerte den Umfang des Vorhabens und realisiert es nun im Alleingang.

Einen weiteren Wendepunkt markiert ExoMars: Die ESA wandte sich an Russland als Partner. Die Zukunft hält vermutlich ganz unterschiedliche solcher internationalen Konstellationen bereit. Europa hat in jüngster Zeit Raumforschungsprojekte mit China und Indien in Angriff genommen und mit der Merkurmission BepiColombo eine groß angelegte europäisch-japanische Zusammenarbeit gestartet.

Fünf Lektionen können Raumfahrtmanager aus diesem krisengeschüttelten Jahr ziehen. Zunächst einmal ist es wichtig, die Motive zu verstehen, aus denen heraus sich ein Land an einer Mission beteiligt. Lassen sich die Absichten der Partner nicht miteinander vereinbaren, kann man nicht auf eine Zusammenarbeit bauen. Ist ein Programm hauptsächlich auf die Fähigkeiten nur eines Partners ausgerichtet, wie zunächst bei ExoMars, kann es geschehen, dass dieser das Programm allein zu Ende bringen muss. Besteht hingegen Einigkeit bei den Zielen – Stichwort Bodenproben –, kann dies andere ermutigen, sich an dem Projekt zu beteiligen.

Zusammenarbeit bedeutet zweitens, dass Konsens und Kompromiss im Mittelpunkt stehen. Dies führt gleichzeitig zum Wachsen des Projekts; keines der beteiligten Partnerländer wird nach Projektbeginn freiwillig seine Ziele zurückschrauben. Man muss also einzelne Module schon früh streichen, falls nötig.

Drittens muss das Managementrisiko innerhalb der Programme reduziert werden. Dazu muss man die Beiträge

Schlaflos im Sexrausch

Manche Vögel tun beim Paarungsmarathon wochenlang kein Auge zu

Der männliche Graubruststrandläufer *(Calidris melanotos)* ist ein echter Don Juan. Bis zu drei Wochen lang jagt er während der Brutzeit in arktischen Breiten ohne Unterbrechung hinter jedem weiblichen Bürzel her. Dabei machen es die Weibchen dem polygamen Verfolger wahrlich nicht leicht. Erst nach längerem Zickzacklauf – vermutlich ein Test auf die Fitness des liebestollen Bewerbers – darf er endlich aufsitzen. Der Lohn der Mühe ist jeweils kurz: Sekundenlang flattert der Begatter begeistert mit den Flügeln, sucht aber gleich wieder das Weite und macht sich auf die Suche nach dem nächsten Abenteuer.

Wenn die Strandläufermännchen ausnahmsweise nicht brünstige Weibchen jagen, kommen sie dennoch nicht zur Ruhe, sondern müssen ihr Territorium und die bereits begatteten Tiere gegen ihre ebenso sexbesessenen Geschlechtsgenossen verteidigen. Und so schläft ein männlicher Graubruststrandläufer während der Brutzeit wochenlang praktisch überhaupt nicht.

Da sogar in und nach derart langen Phasen des Fortpflanzungswettstreits keinerlei Leistungsverlust zu beobachten ist, erhebt sich die grundsätzliche Frage: Wozu brauchen diese Tiere – ja Tiere im Allgemeinen – eigentlich überhaupt Schlaf? Der Reproduktionserfolg eines Strandläufers erweist sich jedenfalls als umso größer, je weniger Schlummer er sich gönnt *(Science 337, S. 1654, 2012)*.

Tatsächlich ist der Sinn des Schlafs ein ungelöstes Rätsel der Evolutionslehre; deren Begründer Charles Darwin (1809–1882) hat darüber anscheinend nie nachgedacht. Manche Fledermäuse schlummern 20 Stunden am Tag, Pferde kommen mit zwei Stunden aus. Zugvögel können ihr Ruhebedürfnis ungestraft enorm einschränken, während bei uns Menschen längerer Schlafmangel schwere Störungen auslöst.

Vermutlich handelt es sich bei dem Phänomen generell um einen heiklen Kompromiss zwischen Energieaufwand für Selbsterhaltung und Fortpflanzung einerseits sowie Energieeinsparung durch Ruhephasen andererseits. Dafür spricht, dass Fleischfresser im Durchschnitt weniger schlafen als tierische Vegetarier: Die Nahrung der Ersteren ist kalorienreicher und wird schneller verdaut, also müssen sie nicht so viel Energie durch Schlafen einsparen *(Science 337, S. 1610, 2012)*.

Beim Menschen agiert das Gehirn als großer Kalorienverzehrer. An sich würden wir beim langsamen Dahinschlendern kaum mehr motorische Energie verbrauchen als im Liegen. Doch unser Gehirn schluckt im Wachzustand ein Viertel der gesamten Körperenergie; erst im Schlaf kommt es halbwegs zur Ruhe.

Das erklärt wohl auch, warum oft diejenigen unter meinen Geschlechtsgenossen, die sich jahrelang die Nächte in Bars und Diskos um die Ohren geschlagen haben, zwar über zahlreiche Liebesabenteuer mit häufig wechselnden Partnerinnen berichten können, dafür aber mit der Zeit durch dunkle Tränensäcke, fahle Gesichtsfarbe und eine gewisse intellektuelle Eintönigkeit auffallen. Wer immerfort die Nacht zum Tag macht wie der polygame Graubruststrandläufer, aber nicht wie dieser evolutionär an wochenlangen Schlafmangel angepasst ist, der bezahlt dafür einen mit den Jahren steigenden Preis.

So kann uns die Betrachtung des tierischen Geschlechtslebens hin und wieder, wenn wir nur wollen, doch die eine oder andere moralische Lehre erteilen. In diesem Sinn mahne ich mit erhobenem Zeigefinger: Nicht alles, was Graubruststrandläufermännchen zu ihrem evolutionären Vorteil treiben, empfiehlt sich unsereinem zur blinden Nachahmung.

Michael Springer

der Partner so modular wie möglich konzipieren. Ein Fehlschlag oder der Austausch eines Partners in einem Teilbereich gefährdet dann nicht notwendigerweise das ganze Programm. Natürlich kann aber trotzdem eine Situation entstehen, in der wie beim JWST ein Partner dem anderen vorauseilt.

Viertens gilt es, das Risiko, dass Partner ein Abkommen brechen, ständig in die Überlegungen einzubeziehen. Es schien unvorstellbar, dass die NASA eine Sample-Return-Mission streichen würde, der die US-amerikanische Wissenschaftsakademie höchste Priorität beimaß. Und doch ist genau das geschehen. Dann bleiben Diplomatie und politische Überredungskunst, vereint mit moralischem Druck aus der Wissenschaftlergemeinde, das letzte Druckmittel.

Fünftens müssen Weltraumwissenschaftler offensiv für den Wert solcher Kooperationen werben. Meiner Ansicht nach geht internationale Zusammenarbeit weit über wirtschaftliche Aspekte hinaus. Sie beseitigt kulturelle Unterschiede, baut Vertrauen auf, eröffnet globales wissenschaftliches Potenzial und trägt inspirierende Gedanken in alle Welt. Der Schaden, den gebrochene Vereinbarungen anrichten – wie rechtlich einwandfrei der jeweilige Vorgang auch sein mag –, muss aus all diesen Gründen unbedingt vermieden werden.

Zu guter Letzt wiegen die wirtschaftlichen Vorteile eindeutig schwerer als die durch Gemeinschaftsprojekte erhöhten Risiken. In vielen Fällen existieren keine Alternativen, und auch auf anderen Forschungsgebieten werden große internationale Kooperationen zur Norm. Lernen wir also aus den Fehlern der Vergangenheit, so dass wir diesen Vorhaben zum Erfolg verhelfen können.

David Southwood war bis 2011 ESA-Direktor für Wissenschaft und robotische Exploration.

© Nature Publishing Group

www.nature.com
Nature 488, S. 451–453, 23. August 2012

Die ungekürzte Fassung dieses Beitrags finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1166521

herrenhäuser FORUM

Mensch-Natur-Technik

Wie wetterfest müssen unsere Städte sein?
Wie verändert das Klima unser Leben?
Wie können wir uns anpassen?

DI 11.12.2012/19.00 / HANNOVER

ANPASSUNG UNTER UNSICHERHEIT–

Sind wir auf den Klimawandel vorbereitet?

MIT **Prof. Dr. Heinke Schlünzen** Meteorologisches Institut, Zentrum für Meeres- und Klimaforschung, Universität Hamburg, **Prof. Dr. Beate Ratter** Institut für Geographie, Universität Hamburg, **Prof. Dr. Richard Pott** Institut für Geobotanik, Universität Hannover, **Prof. Dr. Horst Sterr** Universität Kiel
MODERIERT VON **Dr. Carsten Könneker** Chefredakteur Spektrum der Wissenschaft

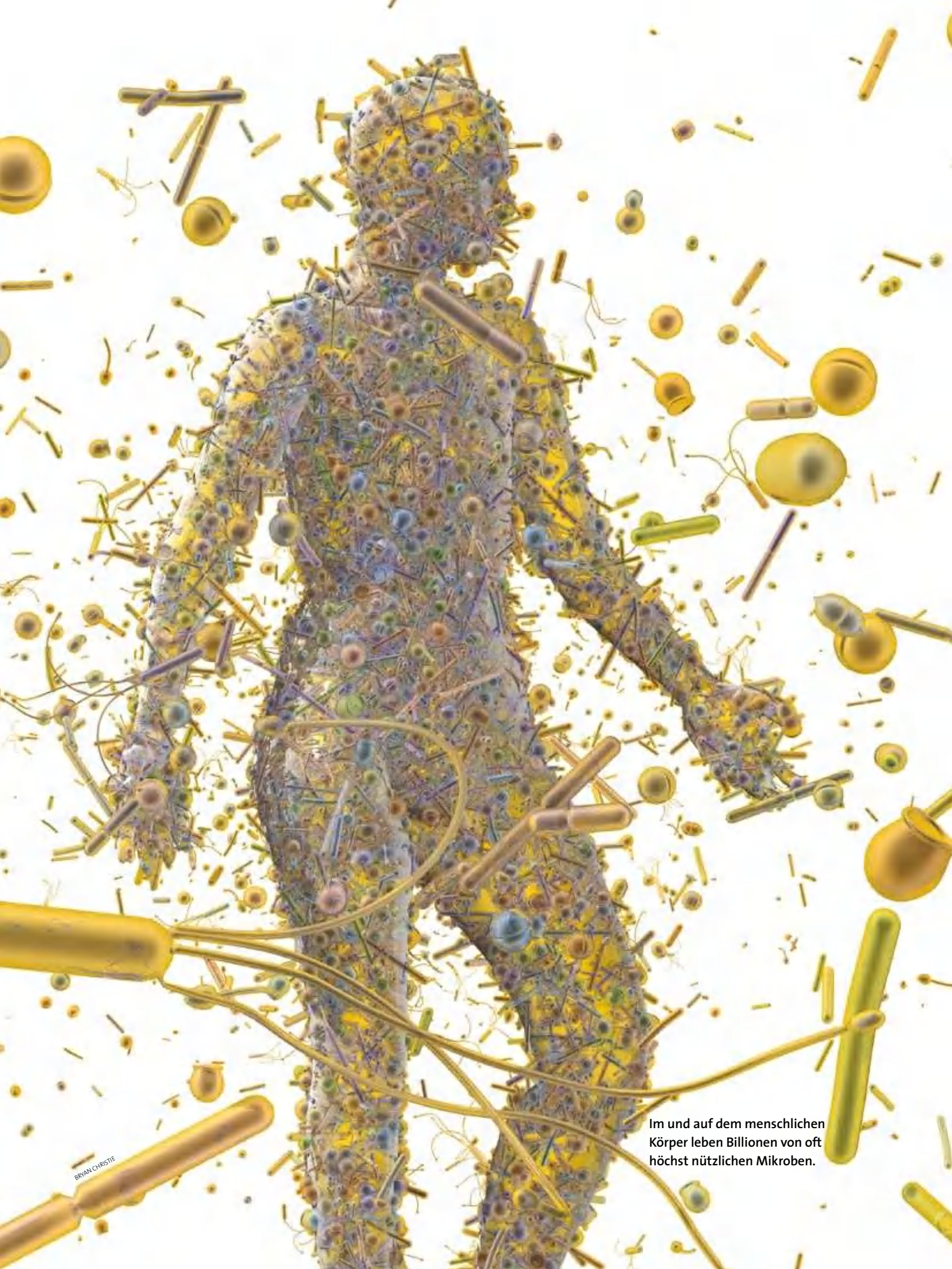
VERANSTALTUNGSORT Kleiner Sendesaal, NDR Funkhaus, Hannover
ANMELDUNG forum@volkswagenstiftung.de
MEHR INFOS www.spektrum.de/mnt

Eine Veranstaltungsreihe von

HERRENHAUSEN

VolkswagenStiftung

Spektrum DER WISSENSCHAFT



BRYAN CHRISTIE

Im und auf dem menschlichen Körper leben Billionen von oft höchst nützlichen Mikroben.

TITELTHEMA: MIKROBEN

Tausend Billionen Freunde

Ist die in westlichen Ländern grassierende Fettleibigkeit auf vermehrte Antibiotikagaben für Babys zurückzuführen? Rühren die zunehmenden Autoimmunkrankheiten von einem Trend zu Kaiserschnittgeburten her? Auf solche Fragen stoßen Forscher, seit sie die unzähligen nützlichen Bakterien näher untersuchen, die so manche wichtige Körperfunktion erst ermöglichen.

Von Jennifer Ackerman

Lange betrachteten Biologen den menschlichen Körper als »physiologische Insel«. Dieser Überzeugung nach reguliert unser Organismus seine Funktionen komplett autark. Zum Beispiel produziert er demzufolge alle Enzyme für die Verdauung des Essens selbst, um mit den gewonnenen Nährstoffen Gewebe und Organe zu erhalten und mit Energie zu versorgen. Und die Zellen unseres Immunsystems lernen ohne fremde Hilfe, wie sie gefährliche Eindringlinge erkennen und vernichten können und dabei das körpereigene Gewebe nicht schädigen.

Doch in den vergangenen zehn Jahren erkannten Wissenschaftler, dass der menschliche Körper eher ein komplexes Ökosystem darstellt, ein »soziales Netzwerk« mit Billionen von Bakterien und anderen Mikroorganismen. Diese besiedeln unter anderem unsere Haut, den Nasen- und Rachenraum, den Genitalbereich, vor allem aber den Darm. Tatsächlich sind die meisten lebenden Zellen in unserem Körper Fremdlinge: Er enthält zehnmal so viele Mikroben wie menschliche Zellen! Diese vielfältige Gemeinschaft von Mikroorganismen mit all ihren Genen bezeichnet man als Mikrobiom. Sie liefert wichtige Hilfestellungen bei grundlegenden Körpervorgängen, von der Verdauung über das Wachstum bis zur Immunabwehr. Mit der Autarkie des Menschen ist es also tatsächlich nicht besonders weit her.

Biologen haben inzwischen viele der in unserem Körper besonders häufig vorkommenden Mikroben beschrieben. In den letzten Jahren untersuchten sie vermehrt, welche Auswirkungen die bakteriellen Mitbewohner im Detail auf uns haben. Dabei gewannen sie nicht nur neue Erkenntnisse über die Arbeitsweise des menschlichen Körpers, sondern auch über mögliche Ursachen von Zivilisationskrankheiten wie Fettleibigkeit und Autoimmunerkrankungen.

Wenn von Mikroorganismen im Körper die Rede ist, denken wir allerdings meist an Krankheitserreger. Tatsächlich konzentrierten sich auch die Forscher lange Zeit nur auf die schädlichen Bakterien und übersahen dabei den potenziellen Nutzen anderer Arten. Sarkis K. Mazmanian, Biologe am California Institute of Technology (CalTech), schreibt dies einer verzerrten Weltsicht zu: »Uns war die menschliche Überheblichkeit im Weg: Wir waren überzeugt, der Mensch verfüge selbst über alle Voraussetzungen für die Gesunderhaltung seines Körpers«, erklärt er. »Aber bloß weil all die Mikroben körperfremd sind und wir sie erst im Lauf unseres Leben aufnehmen, sind sie für uns keinesfalls unwichtig.«

Jeder Mensch beherbergt von klein auf ein komplexes Mikrobiom – wenn auch nicht ganz von Anfang an. Er erwirbt seine ganz persönlichen »Kommensalen« (der Begriff stammt vom lateinischen Wort für Tischgenosse) aus der Umwelt. Da die gesunde Gebärmutter keimfrei ist, führt der Fötus ein steriles Dasein als Einzelwesen. Doch schon während der Geburt nimmt er einige kommensale Bakterien seiner Mutter auf, die seinen Körper besiedeln und sich auf der Haut und den Schleimhäuten vermehren. Das Stillen und der Kontakt zu den Eltern, Großeltern, Geschwistern und

AUF EINEN BLICK

DAS ULTIMATIVE SOZIALE NETZWERK

1 Unser Körper beherbergt zehnmal mehr **Mikroben**, als er eigene Zellen besitzt. Forscher entdecken erst allmählich die vielen **positiven Auswirkungen** dieser Organismen.

2 Die **Zunahme von Fettleibigkeit sowie von Autoimmunerkrankungen** im westlichen Ländern könnte auf das Verschwinden nützlicher Bakterienspezies zurückzuführen sein.

3 Fortschritte in der Computertechnik und der Gensequenzierung ermöglichen es inzwischen, einen detaillierten **Katalog aller bakteriellen Gene** im menschlichen Mikrobiom zu erstellen.

Freunden – und auch zu Bettlaken, Decken, ja sogar Haustieren – führen dann schnell dazu, dass sich mit der Zeit ein immer breiteres Spektrum von Mikroorganismen ansiedelt. Gegen Ende der Kindheit unterhält unser Körper dann eines der komplexesten mikrobiellen Ökosysteme der Erde.

Seit etwa fünf Jahren untersuchen Forscher dieses Ökosystem detaillierter, eine recht knifflige Aufgabe. So haben sich die Bakterien der Darmflora an das sauerstofffreie, dicht besiedelte Innere des Verdauungsapparats angepasst. Viele von ihnen gehen daher in den einsamen Weiten einer Petrischale zu Grunde. Einige Wissenschaftler umgingen das Problem, indem sie statt lebender Bakterienzellen deren Erbinformationen, also ihre DNA und RNA, untersuchten. Mit diesen Molekülen kann man problemlos in der normalen sauerstoffhaltigen Umgebung eines Labors arbeiten.

Wie Forscher herausfanden, lassen sich verschiedene kommensale Bakterienarten mit Hilfe des Gens für die so genannte 16S-ribosomale RNA auseinanderhalten. Das ist ein wichtiger Baustein der Proteinfabriken der Zelle, der Ribosomen. Jede Mikrobenart besitzt eine individuelle Version dieses Gens als unverwechselbares Merkmal. Indem sie die verschiedenen Varianten des Gens bestimmen, erstellen Wissenschaftler einen Katalog des gesamten humanen Mikrobioms. Dadurch lernen sie, welche mikrobiellen Spezies in unserem Körper leben und wie sich deren Zusammensetzung von Mensch zu Mensch unterscheidet.

Aus einer unlösbaren Herkulesaufgabe wurde eine lediglich komplizierte

Im nächsten Schritt analysieren die Forscher weitere Gene der mikrobiellen Lebensgemeinschaft, um herauszufinden, welche davon im menschlichen Körper aktiv sind und welche Funktionen sie erfüllen. Auch das ist eine Herkulesaufgabe: einerseits wegen der großen Zahl an Bakterienarten und andererseits, weil ihre Erbanlagen während der Probenverarbeitung vermischt werden. Aktive bakterielle Gene zu identifizieren, ist zwar relativ einfach – sie einzelnen Spezies zuzuordnen hingegen nicht. Erst die Entwicklung leistungsfähiger Computer und extrem schneller Sequenziermaschinen im vergangenen Jahrzehnt machte aus dieser einst unlösbaren Sortier- und Auswertungsaufgabe eine lediglich noch recht komplizierte.

Zwei unabhängige Arbeitsgruppen, eine in den USA, die andere in Europa, nutzen die neuen Technologien dazu, die Gesamtzahl der bakteriellen Gene im menschlichen Mikrobiom zu bestimmen. Anfang 2010 veröffentlichte das europäische Team seine Ergebnisse über den Verdauungstrakt: Die Forscher identifizierten dort insgesamt 3,3 Millionen verschiedene Gene von über 1000 Bakterienarten – also etwa 150-mal so viele Erbfaktoren, wie wir eigene besitzen.

Die Fortschritte in der Mikrobiomforschung führten zu überraschenden Erkenntnissen. So ist die mikrobielle Flora jedes Menschen einzigartig (siehe auch Spektrum der Wissenschaft 1/2012, S. 19); selbst bei eineiigen Zwillingen unterscheidet sich die Zusammensetzung der kolonisierenden

Mikroorganismen oft dramatisch. Der individuelle Gesundheitszustand und vielleicht sogar bestimmte Verhaltensweisen könnten demnach mehr mit genetischen Variationen des Mikrobioms zu tun haben als mit jenen unseres eigenen Erbguts – hat doch das Humangenomprojekt gezeigt, dass die DNA bei allen Menschen weltweit zu 99,9 Prozent übereinstimmt. Und obwohl die mikrobielle Flora verschiedener Personen in puncto Anzahl und Verteilung der vertretenen Spezies variiert, lässt sich bei den meisten ein gemeinsamer Satz nützlicher bakterieller Gene finden, wobei diese von verschiedenen Arten stammen können. Allerdings: Selbst die nützlichsten Bakterien können schwere Erkrankungen hervorrufen, wenn sie im Körper an Orte gelangen, wo sie nicht hingehören. Beispiele hierfür sind etwa Blutvergiftung und Bauchfellentzündung.

Dass manche Bakterien dem Menschen womöglich nützen, zeigte sich schon vor Jahrzehnten bei Studien zur Verdauung und zur Vitaminproduktion im Darm von Tieren. In den 1980er Jahren stellte sich heraus, dass nur Bakterien über die nötige Enzymausstattung verfügen, mit der sich Vitamin B_{12} aus einfachen Grundstoffen herstellen lässt. Unsere Zellen benötigen es, um Energie zu gewinnen, DNA zu synthetisieren und Fettsäuren zu produzieren. Ebenfalls lange bekannt ist, dass Darmbakterien bestimmte Nahrungsbestandteile abbauen, die sonst unverdaulich wären und unseren Körper ungenutzt wieder verlassen würden. Doch erst in den letzten Jahren entdeckten Forscher, welch zentrale Rollen zwei kommensale Mikrobenarten bei der menschlichen Verdauung und bei der Steuerung des Appetits spielen.

Das vielleicht beste Beispiel für eine nützliche Bakterie ist *Bacteroides thetaiotaomicron*, deren Name ein wenig an die mancher amerikanischer Studentenverbindung erinnert. Die Mikrobe erweist sich unter anderem als höchst vielseitig, wenn es um den Abbau von Kohlenhydraten geht: Sie kann große, komplexe pflanzliche Mehrfachzucker (Polysaccharide) in Glukose und andere leicht verdauliche Einfachzucker zerlegen. Uns Menschen fehlen die meisten der dafür nötigen Gene. *B. thetaiotaomicron* hingegen kann mehr als 260 Enzyme herstellen, die pflanzliche Polysaccharide abbauen, und ermöglicht uns dadurch etwa, Nährstoffe aus Orangen, Äpfeln, Kartoffeln oder Weizenkeimen zu verwerten.

Detailliertere Erkenntnisse über das genaue Zusammenspiel von *B. thetaiotaomicron* mit seinem Wirt ergaben Studien an Mäusen, die zunächst unter völlig keimfreien Bedingungen – also ohne Mikrobiom – aufgezogen und dann ausschließlich mit dieser Bakterie in Kontakt gebracht wurden. Die Forscher der Washington University in St. Louis berichteten 2005, dass die Bakterien aus Polysacchariden kurzkettige Fettsäuren herstellen, die ihnen, aber auch den Mäusen als Nährstoffe dienen. Damit liefern die Untermieter ihrem Wirt zusätzliche Kalorien aus sonst unverdaulichen Ballaststoffen wie etwa Haferkleie. Völlig keimfrei gehaltene Nagetiere müssen daher für die gleiche Gewichtszunahme etwa 30 Prozent mehr Kalorien zu sich nehmen als Nager mit intaktem Mikrobiom.

Die Untersuchung des Mikrobioms hat auch den Ruf der Bakterie *Helicobacter pylori* wiederhergestellt. Sie gehört zu den wenigen Mikroben, die im sauren Milieu des Magens gedeihen. In den 1980er Jahren hatten die australischen Ärzte Barry Marshall und Robin Warren *H. pylori* als eine wichtige Ursache von Magengeschwüren ausgemacht. Daraufhin begannen Ärzte, diese Erkrankungen routinemäßig mit Antibiotika zu behandeln. Die Häufigkeit der von *H. pylori* hervorgerufenen Magengeschwüre hat sich seitdem mehr als halbiert.

Doch so einfach ist die Sache nicht, meint Martin Blaser, Professor für innere Medizin und Mikrobiologie an der New York University, der den Keim seit 25 Jahren erforscht. »Anfänglich dachte ich wie alle, wir hätten es einfach nur mit einem Krankheitserreger zu tun«, sagt er. »Es dauerte ein paar Jahre, bis ich erkannte, dass es sich in Wirklichkeit um eine kommensale Bakterie handelt.« 1998 veröffentlichten Blaser und seine Kollegen eine Studie, der zufolge *H. pylori* dem Menschen hilft, den Säuregrad im Magen zu regulieren, und damit eine Umgebung schafft, die ihm selbst und dem Wirt gleichermaßen nützt. Wenn der Magen zu viel Säure für die Mikroben produziert, beginnen *H. pylori*-Stämme mit dem so genannten *cagA*-Gen Proteine herzustellen, die dem Magen signalisieren, die Säureproduktion zu drosseln. Bei entsprechend anfälligen Menschen hat das cagA-Protein jedoch einen unerfreulichen Nebeneffekt: Es verursacht ebenjene Magengeschwüre, die der Mikrobe ihren schlechten Ruf eingebracht haben.

Ein gutes Jahrzehnt später wies Blaser dann nach, dass *H. pylori* neben der Säureregulation noch eine weitere Aufgabe im Verdauungstrakt erfüllt. Schon seit Jahren kannten die Forscher zwei Hormone, die im Magen produziert werden und die Aufgabe haben, den Appetit zu steuern: Ghrelin, das dem Gehirn Nahrungsbedarf signalisiert, und Leptin, das unter anderem anzeigt, dass der Magen gefüllt ist. »Wenn man morgens aufwacht und Hunger hat, liegt das an einem hohen Ghrelin-Spiegel«, erläutert Blaser. »Das Hormon fordert Sie zum Essen auf. Nach dem Frühstück sinkt der Ghrelin-Spiegel wieder ab.«

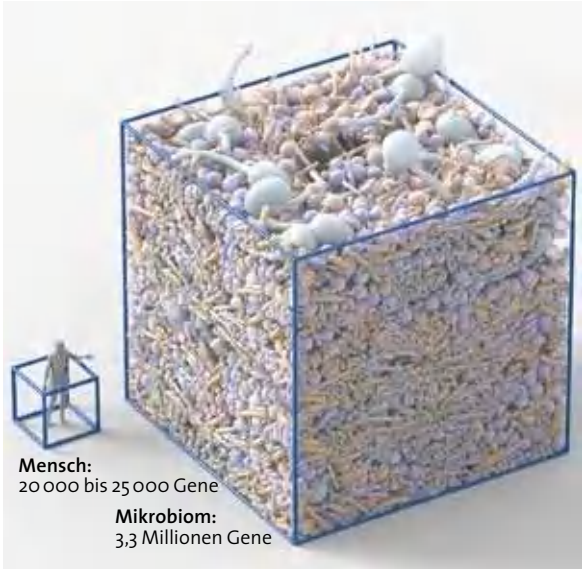
Blaser und seine Kollegen untersuchten nun bei Probanden mit und ohne *H.-pylori*-Besiedelung den Ghrelin-Pegel im Blut jeweils vor und nach den Mahlzeiten. Die Ergebnisse waren eindeutig: »In Gegenwart der Bakterie geht der Ghrelin-Spiegel nach dem Essen zurück. Wird sie mit Antibiotika ausgemerzt, verschwindet dieser Effekt«, sagt Blaser. »*H. pylori* ist also an der Regulation des Ghrelins beteiligt« – und damit an der Steuerung des Appetits. Wie der Keim das bewerkstelligt, ist bisher noch weit gehend unklar. Doch die Folgen sind offensichtlich: In der Studie stieg das Körpergewicht der Probanden nach der Antibiotikabehandlung an, während es in der Kontrollgruppe gleich blieb. Dies dürfte wohl daran liegen, dass der Ghrelin-Spiegel nun nach dem Essen hoch blieb, statt wie normal abzusinken. Die Probanden waren also länger hungrig und aßen dementsprechend zu viel.

Generation Antibiotika

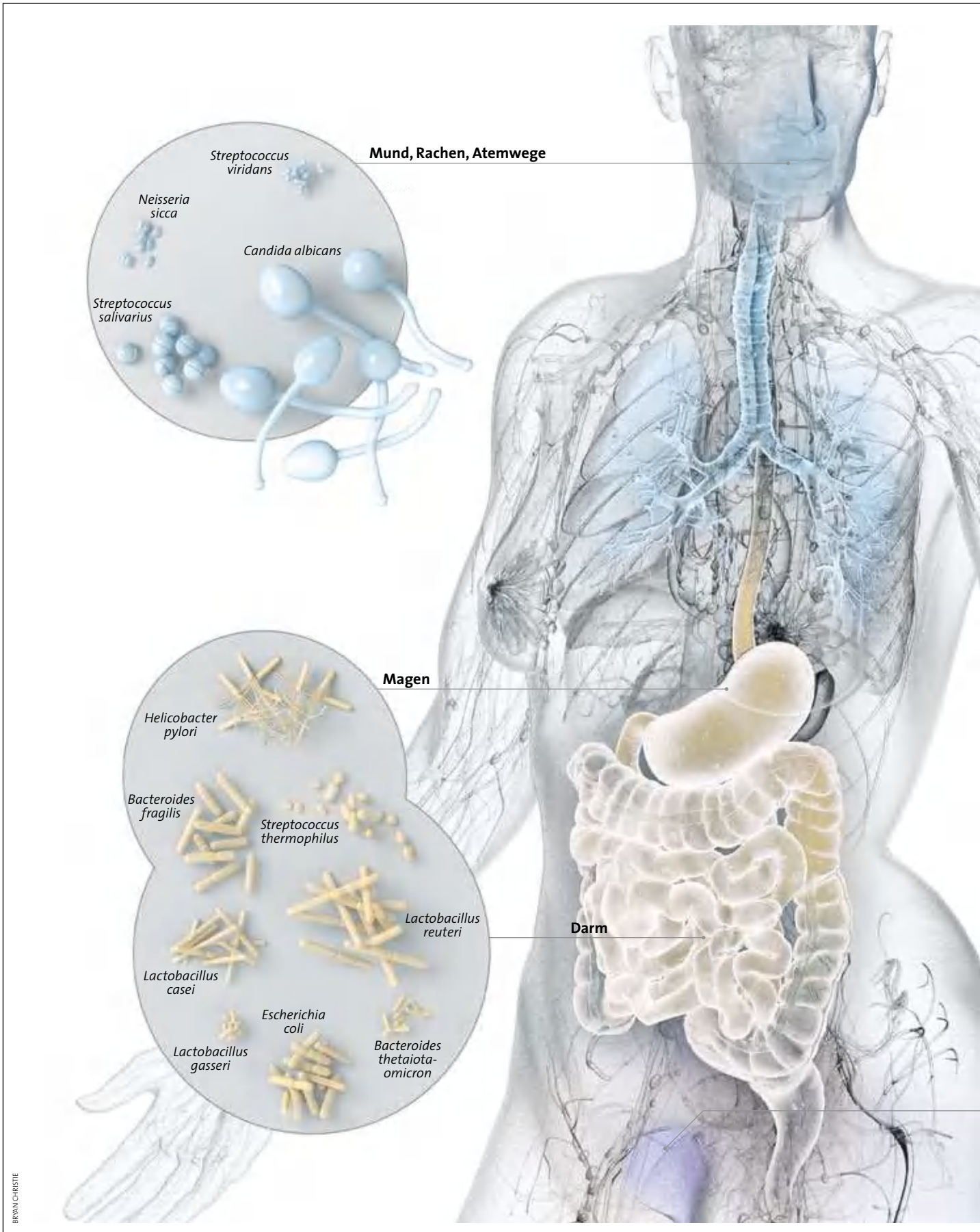
Vor zwei oder drei Generationen beherbergten noch mehr als 80 Prozent aller US-Bürger die Mikrobe. Heute fällt ein Test darauf bei weniger als sechs Prozent der amerikanischen Kinder positiv aus. »Eine ganze Generation wächst ohne *H. pylori* auf, der das Ghrelin in ihrem Magen regulieren könnte«, stellt Blaser fest. Zudem sind bei Kindern, die häufiger mit hohen Dosen von Antibiotika behandelt wurden, auch andere Veränderungen der mikrobiellen Flora zu beobachten. Bis zum Alter von 18 Jahren hat ein US-Amerikaner im Durchschnitt bereits 10- bis 20-mal Antibiotika geschluckt, etwa wegen Mittelohrentzündungen. Blaser glaubt,

Kleine Helfer

Die nützlichen Bakterien im Darm und auf der Haut des Menschen enthalten zusammen weit mehr unterschiedliche Gene als unsere eigenen Zellen. Forscher untersuchen nun genauer, welche der vielen bakteriellen Gene ihrem menschlichen Wirt nützen und wie sie das tun.



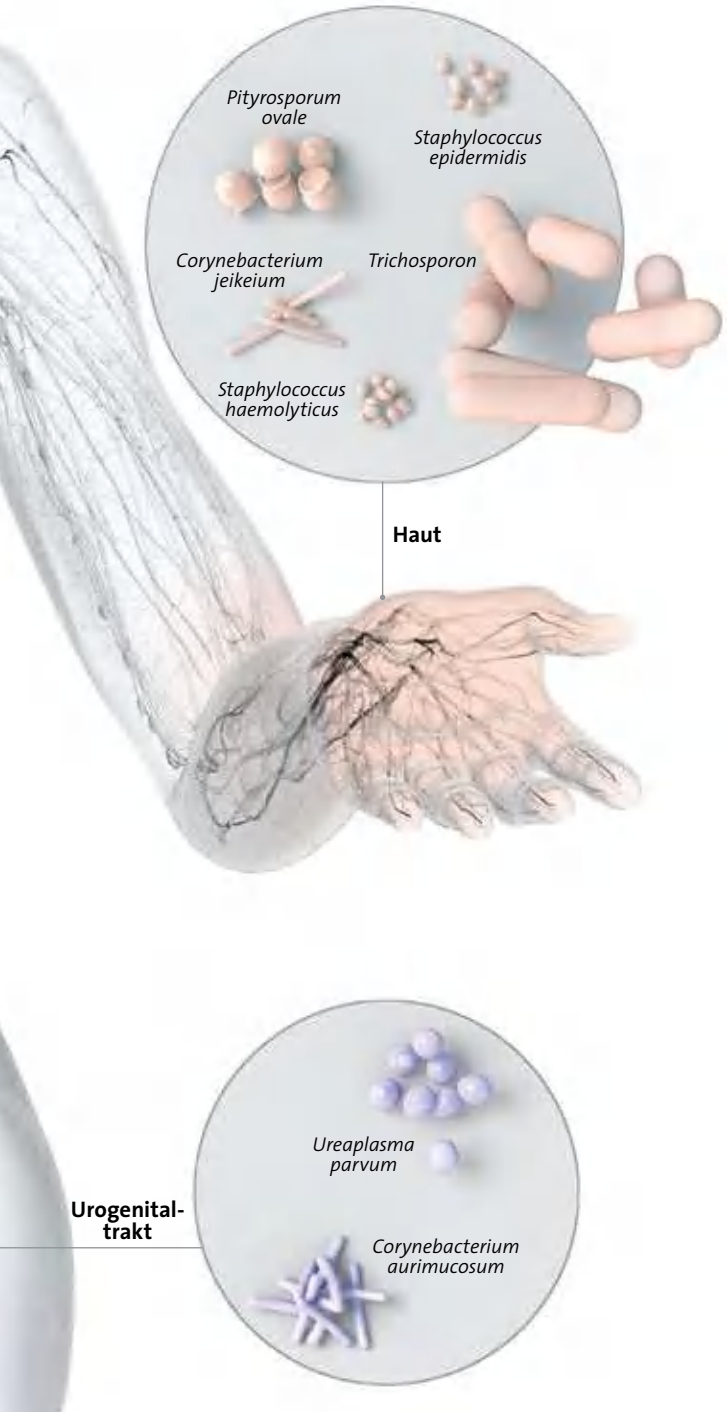
BRYAN CHRISTIE, NACH: EUNOR ACKERMAN



BRYAN CHRISTIE

Für jeden Job die richtige Mikrobe

Überall in und auf unserem Körper finden sich verschiedenste Arten von Mikroorganismen, die ganz unterschiedliche Aufgaben erfüllen. Sie helfen uns gesund zu bleiben, beispielsweise indem sie Krankheitserregern den Zutritt erschweren. Einige Bakterienarten, etwa *Bacteroides fragilis*, üben zudem besonders nützliche Funktionen aus, indem sie die Reifung und Regulation des Immunsystems unterstützen (siehe Grafik S. 32).



dass dies die Darmflora verändert, was die zunehmende Fettleibigkeit bei Heranwachsenden mitverursachen könnte. Die Zusammensetzung des Mikrobioms könnte nämlich laut Blaser mit darüber entscheiden, ob aus bestimmten unspezialisierten Stammzellen Muskel-, Knochen- oder aber Fettzellen hervorgehen. Antibiotikabehandlungen in jungen Jahren, die so manche Bakterienspezies aus dem Mikrobiom eliminieren, könnten die normalen Signalmechanismen stören und damit eine Überproduktion von Fettzellen verursachen.

Die Ergebnisse einer im August 2012 veröffentlichten Studie der New Yorker Forscher an 11 000 Kindern deuten in die gleiche Richtung: Wer im ersten halben Lebensjahr Antibiotika bekam, hatte eine gut 20 Prozent höhere Wahrscheinlichkeit, mit drei Jahren übergewichtig zu sein. Auch in Deutschland wird der Nachwuchs oft mit Antibiotika behandelt. Laut einer Studie der Bertelsmann-Stiftung erhielt 2009 jedes zweite Kind unter den Drei- bis Sechsjährigen solche Medikamente.

Damit könnte das rasche Verschwinden von *H. pylori* und anderen Bakterienarten aus dem menschlichen Mikrobiom zusammen mit der besseren Verfügbarkeit energiehaltiger Nahrungsmittel und dem fortlaufenden Rückgang körperlicher Arbeit möglicherweise eine weltweite Epidemie der Fettleibigkeit auslösen. »Wir wissen noch nicht, wie sehr sich Adipositas auf die Veränderung der mikrobiellen Gemeinschaft zurückführen lässt«, meint Blaser dazu, »aber ich bin sicher, dass ihr Anteil nicht vernachlässigbar ist.«

Der aktuelle Trend zum Kaiserschnitt hat gewichtige Folgen

Der verbreitete Einsatz von Antibiotika ist dabei aus Blasers Sicht nicht die einzige Ursache der derzeit ablaufenden, in der menschlichen Geschichte wohl beispiellosen Umwälzungen in unserem Mikrobiom. So führt die dramatische Zunahme an Kaiserschnittgeburten in den letzten Jahrzehnten dazu, dass wichtige bakterielle Kommensalen nicht mehr bei der Passage des Geburtskanals weitergegeben werden – etwa Laktobakterien aus der mütterlichen Vagina, die dem Säugling helfen, Muttermilch zu verdauen.

In den USA wie auch in Deutschland kommen inzwischen mehr als 30 Prozent der Kinder via Schnittentbindung zur Welt, während in städtischen Zentren Chinas mit seiner Ein-Kind-Politik sogar zwei Drittel aller Entbindungen auf dem Operationstisch und nicht im Kreißsaal stattfinden. Die betroffenen Babys werden dann eher zufällig besiedelt, etwa von Mikroben aus der Luft oder aus dem Kreißsaal. Entsprechend weisen die Kinder eine abweichende Mikroflora auf, oft sogar noch Jahre später. Auch hier scheint Fettleibigkeit eine mögliche Folge zu sein, wie eine Untersuchung von über 1000 Kindern in Massachusetts zeigte: Bei Kaiserschnittkindern lag der Anteil der übergewichtigen rund doppelt so hoch wie bei natürlich geborenen.

In vielen Gegenden der Welt geht zudem die Kinderzahl stark zurück, so dass der Nachwuchs weniger oder keine Geschwister hat. Damit fallen wichtige Quellen für kolonisie-

rende Mikroorganismen weg. Selbst die an sich höchst wünschenswerte Verfügbarkeit sauberen Wassers, die jedes Jahr Millionen Menschen vor dem Tod durch Infektionen bewahrt, reduziert auch die Vielfalt der nützlichen Bakterienarten, denen wir ausgesetzt sind. Insgesamt wachsen immer mehr Menschen in einer mikrobiell verarmten Umwelt auf.

Bakterien wie *B. thetaiotaomicron* und *H. pylori* spielen demnach ungeahnt komplexe Rollen im menschlichen Organismus. Wie geht nun aber der Körper mit all den Untermietern um? Eigentlich sollte sich das Immunsystem, das nach klassischem Verständnis körpereigene Zellen von fremden unterscheidet, im Dauerkrieg mit den zahllosen Eindringlingen befinden. Weshalb also der Darm nicht ständig Schauplatz hitziger Gefechte zwischen menschlichen Immunzellen und Billionen Bakterien ist, bleibt vorerst eines der großen ungelösten Rätsel der Immunologie.

Immerhin: Einige wenige Hinweise geben faszinierende Einblicke in die fein abgestimmte Balance zwischen Mikrobiom und Immunzellen, die sich in den letzten rund 200 000 Jahren etabliert hat. Im Lauf der Evolution haben sich zahlreiche Regulationsmechanismen im Immunsystem entwickelt, die für gewöhnlich verhindern, dass es zu aggressiv vorgeht und das eigene Gewebe angreift oder aber zu nachlässig wird und gefährliche Krankheitserreger übersieht. So spielen beispielsweise T-Zellen eine wichtige Rolle beim Erkennen und Bekämpfen von mikrobiellen Eindringlingen. Außerdem verursachen sie die typische Schwellung, Rötung und Erwärmung, die bei einer Entzündungsreaktion gegen einen Krankheitserreger auftreten. Doch kaum hat der Körper die Produktion von entzündungsfördernden T-Zellen hochgefahren, stellt er auch schon regulatorische T-Zellen her, die der Aktivität der ersteren entgegenwirken.

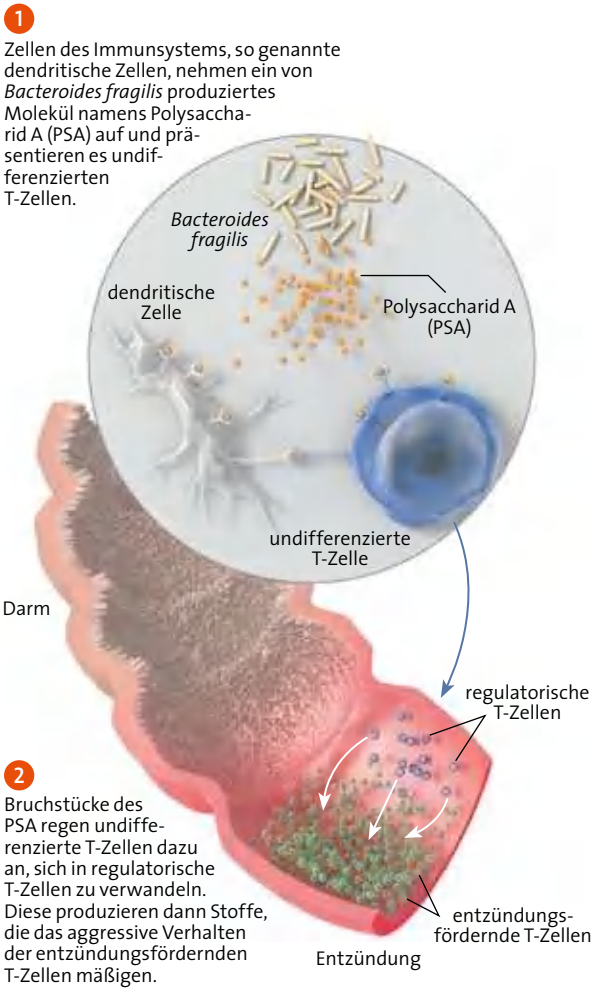
Normalerweise werden die regulatorischen Zellen aktiv, bevor die entzündungsfördernden zu heftig dreinschlagen. »Das Problem ist nämlich, dass viele der Maßnahmen proinflammatorischer T-Zellen zur Infektionsabwehr – etwa das Freisetzen aggressiver Stoffe – letztlich auch unser eigenes Gewebe schädigen«, sagt Mazmanian vom CalTech. Glücklicherweise produzieren regulatorische T-Zellen ein Protein, das den Eifer der entzündungsfördernden zügelt. Sie dämpfen also die Entzündungsreaktion und verhindern, dass das Immunsystem die körpereigenen Zellen und Gewebe angreift. Solange ein ausgewogenes Verhältnis zwischen den aggressiven und den mäßigenden T-Zellen besteht, bleibt der Organismus gesund.

Lange Jahre waren die Forscher der Auffassung, das Immunsystem würde diese Balance völlig selbstständig austarieren. Doch auch hier zeigte sich, wie wenig wir unser Schicksal bestimmen. Mazmanian und andere Forscher finden nämlich immer mehr Hinweise darauf, dass ein gesundes, reifes Immunsystem auf die ständige Mitarbeit nützlicher Bakterien angewiesen ist. »Die Vorstellung, Bakterien könnten die Funktion unserer Immunabwehr optimieren, widerspricht dem herrschenden Dogma«, erklärt er, »doch es kristallisierte sich deutlich heraus, dass die Kommensalen wesentliche Eigenschaften unseres Immunsystems bestimmen.«

Laut Mazmanian und seinem Team hilft eine Mikrobe namens *Bacteroides fragilis*, die etwa 70 bis 80 Prozent aller Menschen bewohnt, dem Immunsystem die Balance zu wahren, indem es dessen antientzündliche Mechanismen stärkt. Die Forscher hatten beobachtet, dass keimfrei aufgezogene Mäuse eine defekte Immunabwehr besaßen, wobei vor allem die regulatorischen T-Zellen nicht mehr richtig arbeiteten. Als das Team den Mäusen *B. fragilis* zuführte, kamen die ent-

Immunregulation im Darm

Untersuchungen an Mäusen, die unter sterilen Bedingungen aufgezogen wurden, zeigten, dass *Bacteroides fragilis* eine wichtige Rolle für die Gesundheit des Darms spielt. In einer Studie bekamen keimfreie Mäuse einen *B.-fragilis*-Stamm, der das Zuckermolekül Polysaccharid A (PSA) produziert. Ihr Darm blieb gesund, wohingegen Mäuse, die einen *B.-fragilis*-Stamm ohne die Fähigkeit zur PSA-Produktion erhielten, eine chronisch-entzündliche Darmerkrankung (Colitis) ausbildeten. Wie die Forscher nachwiesen, stimulierte die Anwesenheit von PSA die Entwicklung regulatorischer T-Zellen, die wiederum die aggressiven T-Zellen ausschalteten.



BRYAN CHRISTIE. NACH STROBER, W.: INSIDE THE MICROBIAL AND IMMUNE LABYRINTH. GUT MICROBES: FRIENDS OF FIENDS? IN: NATURE MEDICINE 16, S. 1195–1197, 2010

Bakterien beeinflussen Medikamentenwirkung

Auch Pharmakologen interessieren sich zunehmend für das Darmmikrobiom. Denn die kleinen Mitbewohner scheinen die Effekte von Medikamenten mittels verschiedener Mechanismen verändern zu können – etwa indem sie die Stoffe so umwandeln, dass sie entweder stärker oder schwächer wirken. Die Bakterie *Eggerthella lenta* inaktiviert beispielsweise das Herzmedikament Digoxin.

zündungsfördernden und -hemmenden T-Zellen ins Gleichgewicht – das Immunsystem der Nager fing wieder an, normal zu funktionieren.

Was passiert dabei genau? In den frühen 1990er Jahren begannen Wissenschaftler verschiedene Zuckermoleküle zu untersuchen, die aus der Zellwand von *B. fragilis* ragen und an denen das Immunsystem die Bakterie erkennt. 2005 konnten Mazmanian und seine Kollegen dann zeigen, dass eines dieser Moleküle die Reifung des Immunsystems fördert: das Polysaccharid A. Wie die Forscher später entdeckten, veranlasst Polysaccharid A das Immunsystem zur verstärkten Produktion regulatorischer T-Zellen, welche die proinflammatorischen T-Zellen daran hindern, die Bakterie anzugreifen. Stämme von *B. fragilis* ohne Polysaccharid A überleben in der Darmschleimhaut nicht, denn die Immunzellen attackieren diese Mikroben, als wären sie Krankheitserreger.

Der Preis der Mikrobenbekämpfung

Bis 2011 hatten Mazmanian und seine Mitarbeiter den kompletten molekularen Signalweg aufgeklärt, der diesen Effekt vermittelt. Es war das erste Mal, dass der vollständige Mechanismus einer solchen Kooperation zwischen Bakterien und Säugetieren, die Experten Mutualismus nennen, beschrieben wurde. »*B. fragilis* hilft uns mit einer überaus nützlichen Leistung, die wir mit unserer eigenen Genausstattung aus unbekannten Gründen nicht zu Wege bringen«, sagt Mazmanian. »Die Mikrobe übernimmt dabei in gewissem Maß sogar die Kontrolle über das Immunsystem.« Und dadurch funktioniert dieses besser. Andere Mikroorganismen dürften das Immunsystem ähnlich beeinflussen, fügt Mazmanian hinzu. »Das ist nur das erste bislang entdeckte Beispiel; es gibt zweifellos noch viele andere.«

Doch auf Grund der Veränderungen der Lebensgewohnheiten im letzten Jahrhundert verschwindet *B. fragilis* ebenso wie *H. pylori* aus unserem Mikrobiom. »Unsere Anstrengungen, Krankheitserreger weit gehend aus der Umgebung zu verbannen, treffen auch nützliche Mikroorganismen«, sagt Mazmanian. »Das geschieht zwar in guter Absicht, aber wir zahlen einen Preis dafür.«

Im Fall von *B. fragilis* könnte der Preis in einer Zunahme von Autoimmunerkrankungen bestehen. Fehlt Polysaccharid A, welches das Immunsystem zur vermehrten Produktion regulatorischer T-Zellen anregt, beginnen die aggressiveren Immunzellen alles anzugreifen, was in ihre Nähe kommt – einschließlich der körpereigenen Gewebe. Mazmanian führt die in letzter Zeit beobachtete sieben- bis achtfache Zunahme von Autoimmunerkrankungen wie Morbus Crohn, Diabetes mellitus Typ 1 und multiple Sklerose auch auf den Rückgang der Besiedlung mit nützlichen Bakterien zurück. »An all diesen Erkrankungen sind genetische und Umweltfaktoren beteiligt«, sagt Mazmanian. »Ich glaube, dass die Umweltkomponente in den Veränderungen unseres Mikrobioms besteht, die das Immunsystem beeinflussen.« Bei Menschen mit entsprechender genetischer Veranlagung könnten diese Umwälzungen zu Autoimmunerkrankungen und anderen gesundheitlichen Störungen führen.

So lautet zumindest die aktuelle Hypothese. Der Zusammenhang zwischen dem Verschwinden nützlicher Bakterien und der Häufung von Autoimmunerkrankungen ist bisher nur eine Korrelation. Ursache und Wirkung zu unterscheiden, ist hier ebenso schwierig wie bei der Fettleibigkeit. Fördern Veränderungen der Darmflora Autoimmunerkrankungen oder schaffen überschießende Abwehrreaktionen und Fettleibigkeit ungünstige Bedingungen für unsere mikrobiellen Mitbewohner? Mazmanian ist davon überzeugt, dass Ersteres zutrifft. Doch »die Beweislast liegt bei uns, den Wissenschaftlern«, sagt er. »Jetzt müssen wir die Kausalbeziehung nachweisen, indem wir die zu Grunde liegenden Mechanismen entschlüsseln. Da wartet noch ein schönes Stück Arbeit auf uns.«

DIE AUTORIN

Jennifer Ackerman ist eine preisgekrönte Wissenschaftsjournalistin und Autorin mehrerer populärwissenschaftlicher Bücher, darunter »24 Stunden: Ein Tag im Leben deines Körpers«. Zurzeit schreibt sie ein Buch über die Intelligenz von Vögeln.

QUELLEN

Blaster, M.J.: Who Are We? Indigenous Microbes and the Ecology of Human Diseases. In: EMBO Reports 7, S. 956–960, 2006

Lee, Y.K., Mazmanian, S.K.: Has the Microbiota Played a Critical Role in the Evolution of the Adaptive Immune System? In: Science 330, S. 1768–1773, 2010

Qin, J. et al.: A Human Gut Microbial Gene Catalogue Established by Metagenomic Sequencing. In: Nature 464, S. 59–65, 2010

Trasande, L. et al.: Infant Antibiotic Exposures and Early-Life Body Mass. In: International Journal of Obesity 10.1038/ijo.2012.132, 2012

WEBLINKS

www.spektrum.de/mikrobiom
Interaktive Grafik mit Informationen über einige der wichtigsten Mikroorganismen, die in und auf unserem Körper leben

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1165730**

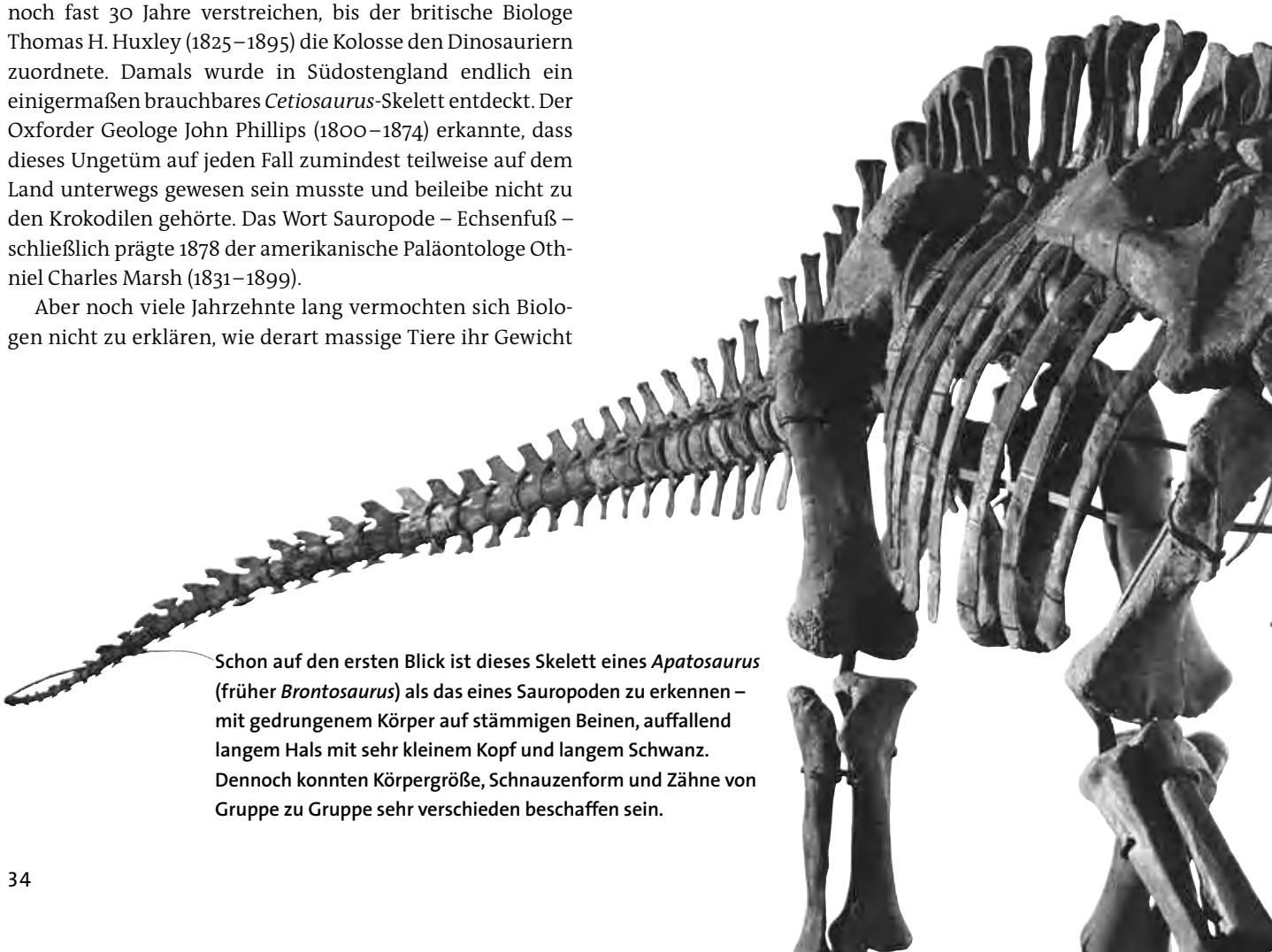
Verkannte Giganten

Sie waren die größten und schwersten Landtiere aller Zeiten – und entgegen einer weit verbreiteten Ansicht evolutionär sehr wendig. Die Sauropoden behaupteten sich bis zum Untergang der Dinosaurier am Ende der Kreidezeit bestens – dank immer neuer Anpassungen an sich wandelnde Umwelten.

Von Kristina A. Curry Rogers und Michael D. D'Emic

An den langhalsigen Giganten mit dem viel zu kleinen Kopf rätseln Naturforscher herum, seit sie deren überdimensionale Knochenfossilien zu Gesicht bekamen. Spätestens in den 1820er und 1830er Jahren tauchten in England die ersten solchen Zeugnisse auf. Als der britische Zoologe und Paläontologe Richard Owen (1804–1892) den Dinosauriern Anfang der 1840er Jahre ihren Namen gab und sie als eine eigene Gruppe abgrenzte, schloss er diese Riesentiere nicht mit ein. Denn er hielt sie für im Meer lebende Krokodile und hatte für sie die Gattungsbezeichnung *Cetiosaurus* geprägt, was so viel heißt wie »Meeresmonsterechse« oder »Walechse«. Letztlich sollten noch fast 30 Jahre verstreichen, bis der britische Biologe Thomas H. Huxley (1825–1895) die Kolosse den Dinosauriern zuordnete. Damals wurde in Südostengland endlich ein einigermaßen brauchbares *Cetiosaurus*-Skelett entdeckt. Der Oxforder Geologe John Phillips (1800–1874) erkannte, dass dieses Ungetüm auf jeden Fall zumindest teilweise auf dem Land unterwegs gewesen sein musste und beileibe nicht zu den Krokodilen gehörte. Das Wort Sauropode – Echsenfuß – schließlich prägte 1878 der amerikanische Paläontologe Othniel Charles Marsh (1831–1899).

Aber noch viele Jahrzehnte lang vermochten sich Biologen nicht zu erklären, wie derart massige Tiere ihr Gewicht tragen konnten. Und weil die Sauropoden zu keinem Lebensraum so recht zu passen schienen – weder zum Meer noch zum Land –, bekamen sie den Ruf schlecht angepasster, weil viel zu groß geratener Pflanzen fressender Ungetüme: zu schwerfällig, um sich längere Zeit in der Erdgeschichte zu behaupten, und darum von vornherein einem baldigen Untergang geweiht. Zumindest, glaubten Paläontologen, handelte es sich um archaische Dinosaurier, die bald von moderneren Vertretern der Gruppe überflügelt und an den Rand gedrängt worden waren. Noch 1991 hieß es, an der höchsten Blüte dieser Reptilien hätten sie keinen



Schon auf den ersten Blick ist dieses Skelett eines *Apatosaurus* (früher *Brontosaurus*) als das eines Sauropoden zu erkennen – mit gedrungenem Körper auf stämmigen Beinen, auffallend langem Hals mit sehr kleinem Kopf und langem Schwanz. Dennoch konnten Körpergröße, Schnauzenform und Zähne von Gruppe zu Gruppe sehr verschieden beschaffen sein.

Anteil gehabt und wären nur so lange erfolgreich gewesen, bis spezialisiertere, mit größeren Gehirnen ausgestattete Pflanzenfresser erschienen. Lediglich in der Periode des Juras, der Phase vor etwa 145 bis 200 Millionen Jahren, konnten die Sauropoden demnach bestehen. Doch in der Kreidezeit – also vor 65,5 bis 145 Millionen Jahren, mit der die Dinosaurierzeit zu Ende ging – gewannen angeblich Gruppen wie die Hadrosaurier (Entenschnabeldinosaurier) und die Ceratopsier (Horndinosaurier) die Oberhand. Damals hielten sich, wie es schien, nur auf der Südhalbkugel letzte Sauropoden.

FOTO: CHRISTOPHER GRIFFITH, CARNEGIE MUSEUM OF NATURAL HISTORY, PITTSBURGH, USA

AUF EINEN BLICK

WAHRE HERRSCHER DER SAURIERZEIT

1 Noch lange nach der Entdeckung ihrer Fossilien im frühen 19. Jahrhundert galten die **Sauropoden** oder Elefantenfußsaurier als sehr altertümliche, schlecht angepasste Dinosaurier, die sich weder für das Leben im Wasser noch auf dem Land wirklich eigneten und deswegen angeblich bald wieder ausstarben.

2 Erst Funde der letzten Jahrzehnte zeigten, dass die riesigen **Pflanzenfresser** fast 150 Millionen Jahre lang sehr erfolgreich und anpassungsfähig waren. Noch bis zum Ende der Dinosaurier vor rund 65 Millionen Jahren brachten sie zahlreiche neue Arten hervor, die sich auch mit der damals aufkommenden Vielfalt der **Blütenpflanzen** bestens arrangierten.

3 Ihren Erfolg verdankten sie einer **Kombination von Reptilien- und Säugetiereigenschaften** sowie Anlehnungen an Merkmale von Vögeln. Zudem verstanden sie es, sich wandelnden Umweltbedingungen rasch zu begegnen.

Heute wissen Paläontologen: Dieses Szenario war grundfalsch. In den letzten Jahrzehnten haben sie auf der ganzen Welt Sauropodenfossilien entdeckt, die eine völlig andere Geschichte erzählen. Allein in den vergangenen zehn Jahren kamen über 60 neue Arten zu Tage. Anscheinend konnten sich diese gigantischen Tiere über weite Abschnitte des Erdmittelalters, somit rund 150 Millionen Jahre lang, bestens durchsetzen (siehe Bild S. 38/39). Viele von ihnen waren wahre Kolosse mit einer Körpermasse an den Grenzen des biologisch Machbaren.

Die Forscher sind nun dabei, die offenen Fragen über die phänomenalen Riesen zu klären. Dank spektakulärer Funde und neuer Analysemöglichkeiten gewannen sie bereits Einblicke in Wachstum, Fortpflanzung, Ernährung und das Anpassungsvermögen gegenüber dramatischen Umweltveränderungen – was die alten Vorstellungen über die Elefantenfußdinosaurier in fast jeder Hinsicht auf den Kopf stellt.

Unerforschte Fossilien in den Lagern von Museen

Wie so viele sind auch wir beide einem solchen Monstrum das erste Mal als Schulkinder im Museum begegnet. Ehrfürchtig staunend haben wir zu dem kleinen Kopf am schier endlos langen Hals hochgeschaut, der alles im Saal weit überragte, sogar die anderen ausgestellten Dinosaurier. Dass solch ein Riesentier einmal auf der Erde gelebt hatte, konnten wir uns kaum vorstellen. Die ersten aufgerichteten Skelette von »klassischen« Sauropoden – allesamt aus dem Jura – tauchten in Museen Ende des 19. Jahrhunderts auf, und um die Jahrhundertwende strebte jedes größere Naturkundemuseum den Besitz eines *Diplodocus*, *Camarasaurus*, *Brachiosaurus* oder *Brontosaurus* an. Das größte aufgerichtete Skelett steht im Berliner Museum für Naturkunde. In jenen Jahren landeten in diesen Forschungsstätten dermaßen viele Sauropodenfossilien, dass mancherorts noch heute eingegipste Stücke in den Katakomben oder Regalen der Untersuchung harren.

Jene »klassischen« Sauropoden repräsentieren allerdings, wie wir erst jetzt erkennen, nur einen kleinen Ausschnitt der gesamten, vielfältigen Gruppe. Die ersten riesenhaften Arten traten vor rund 210 Millionen Jahren auf, in der späten oder Obertrias (siehe Bild S. 38/39). Damals ereignete sich ein Massensterben, dem etliche Reptiliengruppen zum Opfer fielen. Deren Verschwinden öffnete den Dinosauriern den Weg zu ihrem Erfolg. Zwar hatte es sie vorher schon gegeben: Ihre frühesten Fossilien kennen Paläontologen aus rund 230 Millionen Jahre alten Ablagerungen der Südhalbkugel. Aber jene Frühformen bewegten sich auf den Hinterbeinen und waren noch ziemlich klein. Aus ihnen gingen dann später so bekannte Gruppen hervor wie die Fleisch fressenden Theropoden – zu denen *Tyrannosaurus rex* gehört – und eben auch die Elefantenfußdinosaurier.

Als bisher älteste Zeugnisse von echten Sauropoden gelten 225 Millionen Jahre alte Fußspuren in Argentinien und Nordamerika. Deren Verursacher liefen offenbar schon auf vier stämmigen »Elefanten«-Beinen. Nur wenig jünger sind die frühesten bekannten fossilen Skelettteile, die bereits den typischen Körperbau zeigen: der lange, sich verjüngende Hals und Schwanz, der auffallend kleine Schädel und die säulenförmigen Beine, die ein gewaltiges Gewicht zu tragen vermochten. Zu diesen Funden zählen *Isanosaurus* aus Thailand, *Gongxianosaurus* aus China oder *Vulcanodon* aus Simbabwe. Viele Sauropoden besaßen über 100 Wirbel, und schon damals waren sie quasi wandelnde Wirbelsäulen.

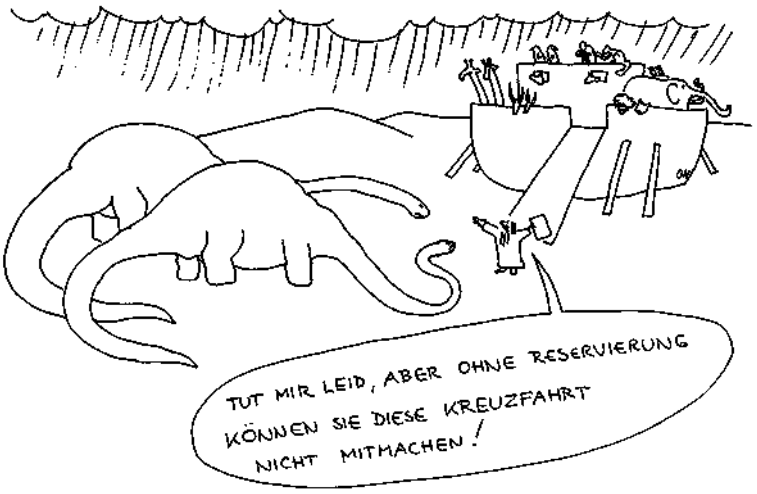
Auch wenn dieser Grundbauplan zeit ihres Daseins erhalten blieb, wurde er später in vielem noch ausgefeilter. Zudem förderte das Auseinanderbrechen der Erdplatten die Aufspaltung der Sauropoden in zahlreiche Linien und immer neue Gattungen und Arten. Bis zu ihrem Ende erlebte die Gruppe wiederholt Aufschwünge und Einbrüche. Es gab nicht nur die eine Blütezeit im Jura, sondern auch später noch weitere mit ebenfalls sehr großen Arten. Beispielsweise traten in der Kreidezeit so bedeutende Gruppen auf wie die stämmigen, teils über 30 Meter messenden Titanosaurier oder die etwas kleineren, 20 Meter langen Rebbachisauriden mit ihrer schaufelförmigen Schnauze. Die neueren Entdeckungen beweisen den Erfolg der Sauropoden in vieler Hinsicht. Sie waren nicht nur sehr weit verbreitet und vielfältig, manche Evolutionslinien existierten auch auffallend lange.

Wie mag ihnen das gelungen sein? Wie konnten solche Kolosse überhaupt leben und in der Welt zurechtkommen? Anscheinend trafen bei ihnen in einzigartiger Weise Reptilieneigenschaften mit Merkmalen zusammen, die eigentlich Säugetieren zugeschrieben werden. Owen irrte zwar, als er diese Kreaturen den Echsen zugesellte, doch in gewisser Weise trifft seine Bezeichnung »Walechsen« den Kern.

Die Sauropoden legten Eier, wie die meisten Reptilien und alle Dinosaurier. 1997 entdeckten der Paläontologe Luis Chiappe vom Natural History Museum of Los Angeles County und sein Team bei Auca Mahuevo in Argentinien in fast 80 Millionen Jahre alten Sedimenten einen Eiablageplatz von Titanosauriern mit tausenden kugelförmigen versteinerten Eiern. In manchen davon fanden sich Embryonen, die ersten von Sauropoden überhaupt. Teilweise sind sogar Haut und Eihüllen fossil erhalten.

»Es gab nicht **nur die eine Blütezeit im Jura,** sondern später noch weitere«

Das war der erste konkrete Hinweis auf die Fortpflanzungsgewohnheiten dieser Tiere. Die Eier waren nur 13 bis 15 Zentimeter groß und wurden zu 20 bis 40 Stück in gegrabene flache Mulden gelegt. Die große Anzahl an Nestern am selben Ort lässt vermuten, dass Titanosaurier große Gruppen bildeten. Mindestens sechsmal scheinen sie besagtes Gebiet zur Eiablage gewählt zu haben. Überzeugende Hinweise auf eine Brutpflege gibt es allerdings nicht. Eher spricht die Dichte der Gelege dafür, dass sie Eier und Nachwuchs sich selbst überließen. Während große Säuger wie Elefanten oder Wale auf ein einzelnes Junges setzen, das sie intensiv umsorgen, folgten die Sauropoden offenbar dem typischen Reptilien-



muster, viel Nachwuchs zu erzeugen, sich dann aber nicht weiter darum zu scheren.

Gar nicht reptilienmäßig war nach heutiger Kenntnis hingegen das Wachstumsschema der Sauropoden. Kein anderes Tier musste oder muss von der Geburt bis zum Erwachsenendasein jemals so viel wachsen. Die Jungen maßen anfangs keinen halben Meter und wogen zunächst unter zehn Kilogramm, während die Erwachsenen der größten Arten 30 Meter Länge hatten und 25 bis über 40 Tonnen gewogen haben mögen. Dagegen wiegen neugeborene Kälber von Afrikanischen Elefanten, deren Bullen sechs Tonnen und mehr auf die Wage bringen, nicht selten schon 120 Kilogramm.

Die meisten frühen Dinosaurierforscher übertrugen einfach die Wachstumsraten anderer Reptilien auf die Sauropoden. Schon die kleineren ihrer Arten hätten dann etwa 60 Jahre gebraucht, bis ihre Größenzunahme sich abflachte und sie endlich fortpflanzungsfähig wurden. Erst mit über 100 Jahren hätten sie volle Erwachsenengröße erreicht. Aber wer sich mit dem Wachsen so viel Zeit lässt, bleibt auch für Fressfeinde über lange Jahre hin angreifbar.

Wachstumsspuren in den Knochen

Das Bild begann sich in den 1960er Jahren entschieden zu wandeln. Damals machte sich der französische Paläontologe Armand de Ricqlès vom Collège de France in Paris daran, die innere Mikrostruktur fossiler Knochen unter anderem von Dinosauriern zu untersuchen. Er wollte damit Hinweise auf Wachstumsmuster und somit die Lebensgeschichte der Tiere finden. Denn solche Fossilien lassen oft noch die einstige Verteilung der Knochenmineralien und Hohlräume für Blutgefäße erkennen sowie Spuren, die ein Knochenumbau beim Wachstum oder mit der Geschlechtsreife hinterließ. Wie es demnach aussieht, wuchsen die Sauropoden in einem geradezu rasanten Tempo. Zumindest beeilten sie sich wesentlich mehr als heutige Reptilien. Sie kamen darin wohl eher modernen großen Säugern gleich, von denen viele kein Jahrzehnt bis zur Geschlechtsreife benötigen (siehe »Rasanter Riesenwuchs bei Dinosauriern«, SdW 5/2006, S. 26).

Ein so schnelles Wachstum muss mit einem besonders hohen Nahrungsbedarf einhergegangen sein. Wie es ihnen gelang, ihren enormen Appetit zu stillen, gehört allerdings noch zu den offenen Fragen. Sie fraßen Pflanzen, und die verschiedenen Arten taten das jeweils auf ihre eigene Weise. Manche bissen in derbe, harte Vegetation, andere wählten zartes, weicheres Futter, das sie vermutlich abbissen oder abstreiften. Solche Unterschiede erschlossen Forscher schon früher aus der Form der Zähne und winzigsten Abriebspuren daran, Rekonstruktionen der Kiefermuskulatur und Analysen der Biomechanik beim Öffnen und Schließen der Kiefer.

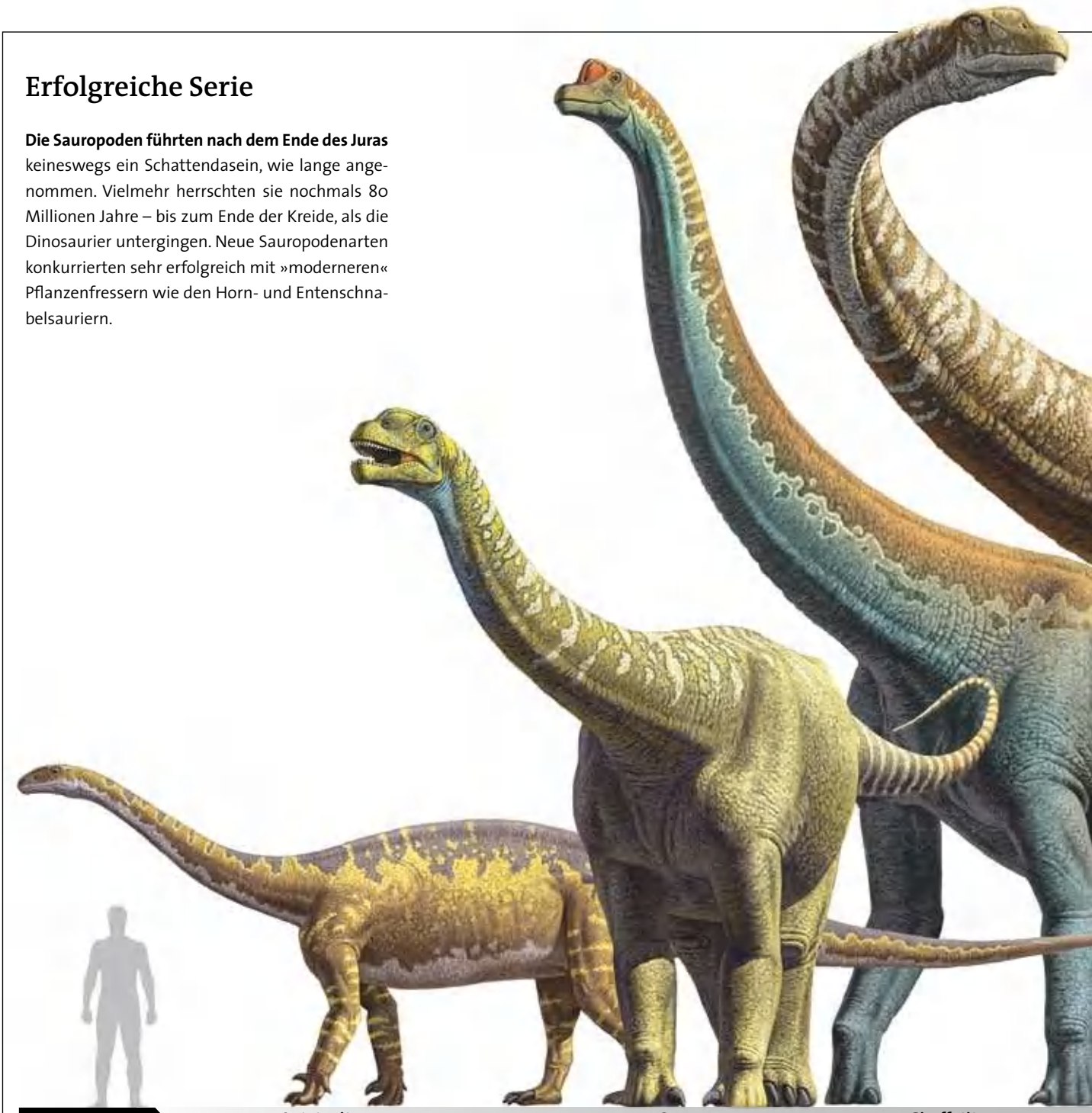
Die Sauropoden kauten ihre Nahrung kaum – darin sind sich die Forscher ziemlich einig. Somit wurde das Futter wohl erst im Magen-Darm-Trakt gründlich zerkleinert. Eine Zeit lang dominierte die Ansicht, dass die Tiere Magensteine – Gastrolithen – besaßen, die die Nahrung zermahlten, ähnlich wie bei Vögeln. Im Westen Nordamerikas finden sich oftmals glatt polierte Steine in Formationen mit ihren Fossilien. Dieser These widersprachen jedoch vor einigen Jahren Oliver Wings, heute am Museum für Naturkunde Berlin, und Martin Sander von der Universität Bonn. Die beiden Paläontologen hatten untersucht, wie sich Steine in Vogelmägen verändern und abbauen. Sie stellten fest, dass die vermeintlichen Sauropodengastrolithen nicht die charakteristische raue, unregelmäßige Oberfläche der Vogelmahlsteine aufweisen. Gegen die These spricht außerdem die Seltenheit solcher glatten Steine im Bauchraum der Skelette und die oft fragwürdige Zuordnung. Wings und Sander schlossen daraus, Sauropoden hätten die Nahrung mit Hilfe bakterieller Gärung aufgeschlossen, so wie heutzutage etwa Nashörner. Sie besaßen ja einen sehr langen Verdauungstrakt.

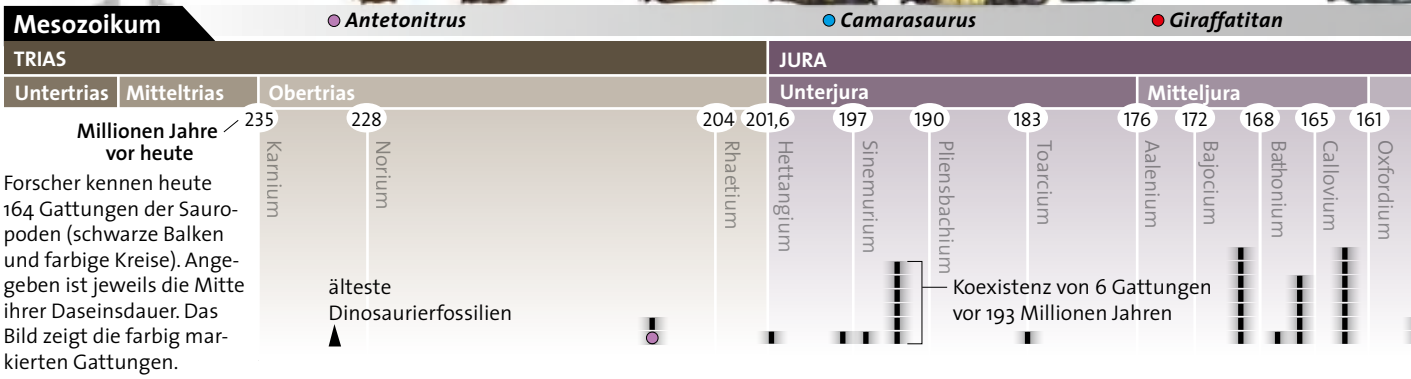
Und welche Bedeutung hatte ihr Markenzeichen, der lang gestreckte Hals, beim Fressen? Früher hieß es, damit hätten sie hoch in die Baumwipfel gereicht und sich so Ressourcen erschlossen, die für kleinere Tiere nicht erreichbar waren. Verschiedene Forschungen zeigen nun, dass diese Vorstellung zu pauschal ist. John Whitlock von der University of British Columbia in Vancouver hat Ernährungsstrategien von Diplodocoiden rekonstruiert. Diese lebten vom Spätjura bis zur Spätkreide, und zu ihnen zählen Giganten wie *Apatosaurus* (siehe Bild S. 34/35) und *Diplodocus*. Für seine Untersuchungen verglich er die Schnauzenformen und Abriebspuren an den Zähnen. Hiernach waren manche Arten Generalisten, die alle möglichen Sorten von Futter fraßen. Andere hatten sich auf bestimmte Pflanzen spezialisiert. Manche ästen niedrige Gewächse, andere bedienten sich an Bäumen. Den Studien anderer Forscher zufolge variierte bei den Sauropoden die Beweglichkeit des Halses. Nur einige von ihnen konnten hoch in die Bäume gelangen, andere dafür den Hals besonders gut weit nach unten biegen. All das dürfte erklären helfen, wieso sich die verschiedenen Arten in den gleichen Ökosystemen offenbar wenig Konkurrenz machten.

Gleichzeitig mit dem Aufstieg der Blütenpflanzen in der Kreidezeit entstanden bei den Sauropoden zahlreiche Anpassungen an diese neuartige Nahrung. Das passt nicht zu

Erfolgreiche Serie

Die Sauropoden führten nach dem Ende des Juras keineswegs ein Schattendasein, wie lange angenommen. Vielmehr herrschten sie nochmals 80 Millionen Jahre – bis zum Ende der Kreide, als die Dinosaurier untergingen. Neue Sauropodenarten konkurrierten sehr erfolgreich mit »moderneren« Pflanzenfressern wie den Horn- und Entenschnabelsauriern.

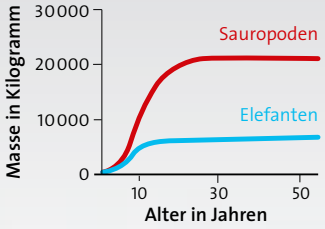




Forscher kennen heute 164 Gattungen der Sauropoden (schwarze Balken und farbige Kreise). Angegeben ist jeweils die Mitte ihrer Daseinsdauer. Das Bild zeigt die farbig markierten Gattungen.

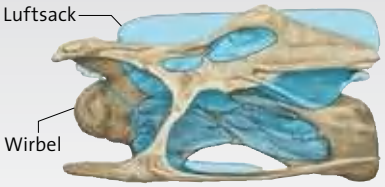
Rasantes Wachstum

Sauropoden wuchsen eher säugetierähnlich, viel schneller als Reptilien sonst. Schon nach wenigen Jahrzehnten erreichten sie ihre volle Größe.



Effektive Atmung

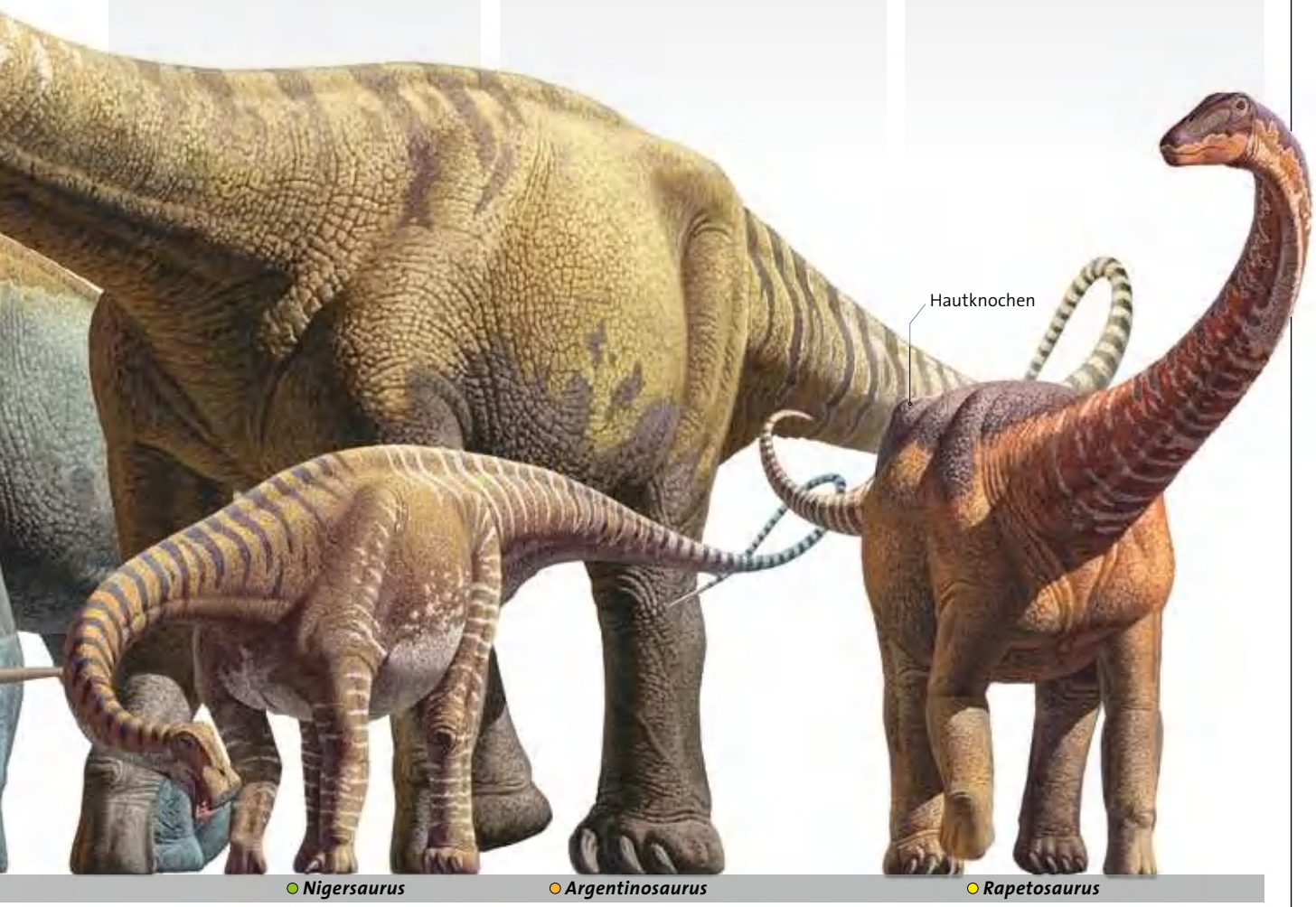
Hohle Wirbel machten die Tiere leichter. Womöglich bildeten die Lungen in sie hinein Luftsäcke ähnlich wie bei Vögeln – was die Sauerstoffversorgung der Giganten verbessert haben könnte.



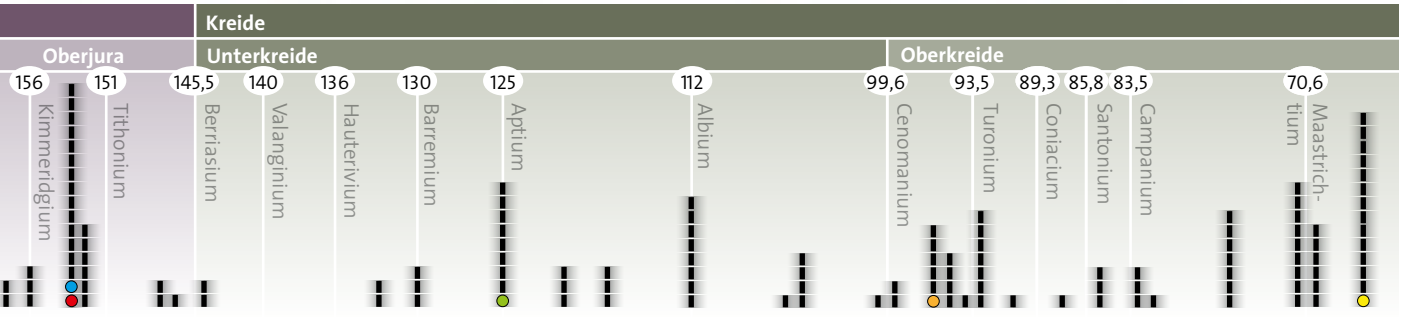
Kalziumreserven

Manche Sauropoden trugen in der Haut dicke Knochenplatten, die in Notzeiten die Mineralversorgung sichergestellt haben mögen. Denn bei älteren Tieren sind diese Knochen hohl.

Hautknochen eines Titanosauriers im Anschnitt



● *Nigersaurus* ● *Argentinosaurus* ● *Rapetosaurus*



ILLUSTRATIONEN: RAÚL MARTIN; WIRBELDETAIL (OBEN MITTE) NACH: DANIELA SCHWARZ-WINGS, MUSEUM FÜR NATURKUNDE, BERLIN; GRAFIKEN: JEN CHRISTIANSEN; ZEITSKALA NACH: GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA; WACHSTUMSKURVEN (OBEN LINKS) NACH: KRISTINA A. CURRY ROGERS UND MICHAEL D. D'EMIC

der alten Ansicht, dass sie in dieser Phase nur noch ein Schattendasein führten. Ihnen seien, glaubte man, nun andere Pflanzenfresser überlegen gewesen, die mit den frisch aufgetauchten Gewächsen angeblich viel besser zurechtkamen, etwa Entenschnabel- und Horndinosaurier. Diese waren mit immerfort nachwachsenden Zahnbatterien ausgestattet, die wie ein einziger mächtiger Zahn funktionierten. Was konnten ungeschlachte Viecher mit Riesenleibern, kleinen Köpfen und schwachen Gebissen dem schon entgegensetzen?

Nach neuerer Erkenntnis traten die Sauropoden jedoch in der Kreide vielfältiger auf als je zuvor, was diesen Evolutionsabschnitt für die Forschung besonders interessant macht. Die Gruppe entwickelte sich jetzt in sehr verschiedene Richtungen mitsamt neuen körperlichen Erscheinungen. Sie fand auch diverse Wege, eine breite Palette von Pflanzen zu erschließen. *Nigersaurus* beispielsweise, der vor 115 Millionen Jahren lebte, gehörte zu den schon erwähnten Rebbachisauriden (siehe Bild S. 38/39, Mitte). Paul Sereno von der University of Chicago und seine Kollegen entdeckten die Fossilien in den späten 1990er Jahren im Niger. Das Tier besaß ein breites, kastenförmiges Gebiss mit vorn quer zum Kiefer stehenden Zahnbatterien, die sich monatlich erneuerten – bis zu doppelt so schnell wie bei Horn- und Entenschnabelsauriern. Es benötigte wohl stets frische, scharfe Zähne, um unten am Boden Pflanzen abzubeißen. Denn nach der Ausrichtung des Gleichgewichtsorgans im Innenohr zu urteilen, richtete es seine Schnauze gewöhnlich nach unten. Andere Sauropoden hielten den Kopf meist eher waagerecht.

Inwiefern die Zunahme von Blütenpflanzen während der Kreidezeit den Speiseplan dieser Saurier bereicherte, zeigen mikroskopische Studien an Koprolithen – fossilen Kotballen. Silikathaltige so genannte Phytolithen darin stammen von gefressenen Pflanzen. In Kotfossilien von Titanosauriern entdeckten Vandana Prasad vom Birbal-Sahni-Institut für Paläobotanik in Lucknow in Nordindien und ihre Kollegen Spuren von mindestens fünf Grassorten, aber auch welche etwa von Magnolien, Nadelhölzern und Palmen, wie sie 2005 berichteten. Das bedeutet nicht nur, dass manche Sauropoden eine Vielzahl von Pflanzen vertilgten, sondern auch, dass es moderne Gräser 30 Millionen Jahre früher gab als bisher gedacht. Wie für alle Pflanzenfresser, die schnell wachsen müssen, lohnte es sich auch für diese, nicht wählerisch zu sein. Sie stürzten sich also geradezu auf die neuartige Vegetation, und viele von ihnen stopften in sich hinein, was immer sie fanden oder erreichen konnten.

Hohle Knochen – auch im Dienst der Atmung

Die Atmung der Sauropoden funktionierte wahrscheinlich weder wie bei Reptilien noch wie bei Säugetieren. Die Forscher vermuten, dass sie vielmehr ähnlich wie Vögel atmeten. Bei Säugetieren vermischt sich die frische eingeatmete Luft mit der verbrauchten in der Lunge. Vögel aber haben von der Lunge abzweigende Luftsäcke, die es erlauben, dass stets frische Luft wie auf Einbahnstraßen nachfließt und von der Lunge besser ausgenutzt wird. Die Luftsäcke dringen auch in Hohlräume von Knochen vor, etwa von Wirbeln. Ganz ähnlich wie diese sehen innere und äußere Höhlungen und versteifende Strukturen in Sauropodenwirbeln aus. Die stärksten Aussparungen finden sich in den Wirbeln von Hals und oberem Rumpf. Manche Arten wiesen aber auch welche an den Hüft- und sogar an den Schwanzwirbeln auf.

Sicherlich war die Hauptfunktion davon eine beträchtliche Gewichtseinsparung, die ja auch bei Vögeln eine Rolle spielt. Die riesigen Halswirbel des nordamerikanischen Kolosses *Sauroposeidon* etwa waren zu über drei Viertel luftgefüllt. Zugleich könnten die Hohlstrukturen aber einem Luftsacksystem gedient haben, dank dessen die Sauropoden

TYLER KEILLOR

Mitunter finden sich bei Gelegen von Sauropoden Schlangenfossilien. In dem in der Illustration nacherzählten Fall maß die Nesträuberin über drei Meter. Jeffrey Wilson von der University of Michigan in Ann Arbor und Kollegen entdeckten die Versteinerungen 1984 in Indien.

MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de

Unser Online-Dossier »Saurier« finden Sie unter

www.spektrum.de/saurier

effektiver atmeten. Womöglich verhalf ihnen das zu einem gleichmäßigen erhöhten Stoffwechsel und zu mehr Aktivität, was dem raschen, starken Wachstum zugutegekommen sein mag.

Tiere dieser Größe hatten von Raubfeinden wohl nichts mehr zu befürchten, nicht einmal vom zwölf Meter langen *Allosaurus*. Schon halbwüchsig hätten viele Sauropoden auf ausgewachsene Elefanten herabgeblickt. Die Kehrseite war aber, dass so ein Riese Zeiten von Nahrungs- oder Wasserknappheit umso empfindlicher zu spüren bekam. Es könnte jedoch sein, dass sogar in diesem Fall spezielle Anpassungen gegen Engpässe halfen.

Ein paar Titanosauriern wuchsen in der Haut bizarre Knochenplatten, so genannte Osteoderme. Ähnliches gibt es auch heute, man denke nur an die Knochenpanzer von Krokodilen oder Gürteltieren. Bei den Dinosauriern kam dergleichen gar nicht selten vor. *Stegosaurus* beispielweise beeindruckt wegen der riesigen, breiten »Dornen«, die seinen hochgekrümmten Rücken verzierten. Doch wo genau die Hautknochen bei Sauropoden saßen und was sie bedeuteten, war bisher ein Rätsel.

Wir selbst haben kürzlich zwei große Knochenplatten untersucht, die auf Madagaskar bei zwei Titanosaurierskeletten gefunden worden waren, einem jugendlichen und einem erwachsenen *Rapetosaurus*. Die vom großen Tier ist 57 Zentimeter lang, gut 27 Zentimeter dick und hat ein Volumen von fast zehn Litern – der massivste bisher aufgetauchte Osteoderm eines Wirbeltiers. Analysen von Computertomogrammen und Bohrkernen dieser Fossilien ergaben, dass die innere Knochensubstanz im Lauf des Lebens zu einem beträchtlichen Teil verschwand. Vermutlich wurde sie durch Weichgewebe ersetzt. Bei dem großen Exemplar machte das fünf Liter aus, über die Hälfte des ursprünglichen Knochengewebes.

Schutzschilde können das kaum gewesen sein – sie wären bei einem starken Aufprall oder kräftigen Biss zerbrochen. Außerdem besaß ein *Rapetosaurus*, wohl ebenfalls wie einige andere Titanosaurier, nur wenige solche Knochenplatten. Auch zur Wärmeregulation, wie für manche Fälle diskutiert – etwa *Stegosaurus* –, konnten sie nicht gedient haben, denn dazu passen weder das geringe Oberflächen-Volumen-Verhältnis noch die spärliche Anzahl. Wir glauben vielmehr, dass sie Mineralspeicher darstellten. Dank ihrer konnten Titanosaurier selbst in unwirtlichen Zeiten weiterwachsen und Eier legen. Ähnliches gewähren Osteoderme bei einigen heutigen Tieren.

Bei allen Wirbeltieren werden bei Bedarf Knochenmineralien eingesetzt, um den Blutkalziumspiegel aufrechtzuerhalten. In manchen Zeiten kann der Abbau steigen, etwa zur Eiablage oder bei Nahrungsmangel. Er nimmt auch mit dem Lebensalter zu, was beim Menschen zu Osteoporose führen kann. Weil Hautknochenplatten stark durchblutet sind, eignen sie sich gut dazu, Mineralnachschub zu liefern. Für die Titanosaurier Madagaskars in der Spätkreide, aber auch andernorts wäre diese Funktion sehr gut vorstellbar. Die Insel erlebte damals wiederholt heftige Dürrephasen. Raubsaurier wie der sieben Meter lange *Majungasaurus* wurden zu Kannibalen, und unzählige Tierarten gingen unter – darunter Frösche, Vögel und sogar einige Sauropoden.

Mit ihrer Größe und ihrer Wachstumsgeschwindigkeit stießen die Elefantenfußdinosaurier offenbar an die Grenze des biologisch Möglichen. Aber sie landeten mit all ihrer Extravaganz nicht etwa in einer evolutionären Sackgasse, sondern blieben 150 Millionen Jahre lang äußerst erfolgreich.

DIE AUTOREN

Kristina A. Curry Rogers und **Michael D. D'Emic** sind Wirbeltierpaläontologen. Curry Rogers arbeitet am Macalester College in St. Paul (Minnesota). Sie erforscht Leben und Evolution von Sauropoden und hat deren Fossilien in verschiedensten Weltgegenden aufgespürt, unter anderem in Argentinien und Simbabwe. D'Emic arbeitet an der Georgia Southern University in Statesboro. Sein Schwerpunkt sind frühkreidezeitliche Sauropoden von Montana und Wyoming. Besonders interessieren ihn die Titanosaurier.

QUELLEN

Curry Rogers, K. A., Wilson, J. A.: The Sauropods: Evolution and Paleobiology. University of California Press, Berkeley 2005

Curry Rogers, K. A. et al.: Sauropod Dinosaur Osteoderms from the Late Cretaceous of Madagascar. In: Nature Communications 2, 564, 2011

Sander, P. M. et al.: Biology of the Sauropod Dinosaurs: the Evolution of Gigantism. In: Biological Reviews 86, S. 117–155, 2011

Whitlock, J. A.: Inferences of Diplodocoid (Sauropoda: Dinosauria) Feeding Behavior from Snout Shape and Microwear Analyses. In: PLoS One 6, e18304, 2011

Wings, O., Sander, P. M.: No Gastric Mill in Sauropod Dinosaurs: New Evidence From Analysis of Gastrolith Mass and Function in Ostriches. In: Proceedings of the Royal Society of London B 274, S. 635–640, 2007

LITERATURTIPPS

Saurier und Urvögel. Spektrum der Wissenschaft, Digest 5/1997

Tiere der Urzeit. Spektrum der Wissenschaft, Dossier 1/2005

Sonderhefte von »Spektrum der Wissenschaft« unter anderem über verschiedene Fragen zu Dinosauriern

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1165731**

Das geheimnisvolle Innenleben der Zellen

Unter dem Mikroskop gibt es noch ungeahnt viel zu entdecken: In jüngster Zeit stießen Biologen auf eine Vielfalt neuer, faszinierender Strukturen – die offenbar ganz unterschiedliche Aufgaben erfüllen.

Von Roberta Kwok

Vor vier Jahren stand Chalongrat Noree vor einer zunächst abschreckend wirkenden Aufgabe: Hunderte von Hefekulturen detailliert unter dem Mikroskop zu untersuchen. In jeder war ein anderes Protein mit Fluoreszenzfarbstoffen markiert. So hoffte der Doktorand an der University of California in San Diego neue Strukturen im Inneren der Zellen zu entdecken.

Und in der Tat zeigten sich schon bald erste Ergebnisse: Binnen eines Monats fand Noree eine große Zahl verschiedener Proteine, die sich jeweils zu Aggregaten oder langen Strängen zusammenlagern. »Stellen Sie sich vor, Sie stoßen jede Woche auf eine bislang unbekannte intrazelluläre Struktur«, beschreibt der Zellbiologe Jim Wilhelm, Norees Doktorvater, die Situation. »Es war wie ein Glücksspielautomat, der jedes Mal Geld ausspuckt, wenn man den Hebel zieht.«

Damit wirken die üblichen Darstellungen der Zelle, auf denen in erster Linie Kern, Mitochondrien, Ribosomen und Golgiapparat zu sehen sind (siehe Bild rechts), zunehmend überholt. Neue Techniken und ein bisschen Glück brachten eine komplexe Welt von Schläuchen, Säckchen, Klümpchen, Fäden und Kapseln zum Vorschein. Zwar stellten sich einige dieser Gebilde schlussendlich als bereits seit Jahrzehnten bekannt heraus, doch viele wurden tatsächlich erst vor Kurzem entdeckt. Zum Beispiel fand Wilhelms Team sechs verschiedene Typen von Filamenten, die zuvor nicht beschrieben oder zumindest kaum beachtet worden waren.

Rätselhafte Verbindungsleitungen

Zu den Strukturen, die Forscher jetzt wieder vermehrt beachten, gehören die so genannten Nanotubes: zwischen den Zellen aufgespannte Röhrchen aus Zellmembranen. Im Jahr 2000 probierte Amin Rustom, damals Doktorand an der Universität Heidelberg, einen neuen Farbstoff für die Betrachtung von Tumorzellen aus Ratten unter dem Mikroskop aus. Dabei ließ er einige der üblichen Waschprozeduren weg – mit einem überraschenden Resultat. »Er sagte: ›Ich sehe da was. Keine Ahnung, was es ist, aber es sieht interessant aus‹«, erinnert sich sein Doktorvater, der Zellbiologe Hans-Hermann Gerdes, der heute an der norwegischen Universität Bergen arbeitet. Die von Rustom entdeckten Röhrchen waren derart pfeilgerade, dass Gerdes sich anfangs fragte, ob es sich nicht schlicht um Kratzer auf der Zellkulturschale handelte.

Letztlich kam das Team 2004 aber zu dem Schluss, dass es sich bei den beobachteten Strukturen, die so lang werden können wie mehrere Zellen, tatsächlich um Kanäle handle. Sie könnten beispielsweise kleine Organellen von einer Zelle zur anderen transportieren. Im gleichen Jahr äußerte eine Arbeitsgruppe um den Immunologen Daniel Davis am Imperial College in London die Vermutung, Immunzellen würden auf solchem Weg Signale austauschen. Davis erzählt: »Es gab unter den Zuhörern unserer Vorträge stets einige, die sagten, sie hätten diese Fäden schon in den siebziger oder achtziger Jahren gesehen.« Doch niemand hatte damals den seltsamen Röhrchen größere Aufmerksamkeit geschenkt.

Weitere Studien entdeckten Nanotubes in vielen anderen Zelltypen von Säugetieren. Davis' Arbeitsgruppe fand heraus, dass Leukozyten sie nutzen, um Krebszellen zu vernichten: entweder um diese wie mit einem Fangseil zu sich heranzuziehen oder um darüber todbringende Signale zu übertragen.

AUF EINEN BLICK

ZELLFABRIKEN UND PROTEINSCHLANGEN

1 In den letzten Jahren fanden Forscher eine ganze Reihe bislang unbekannter oder zumindest unbeachteter **Strukturen innerhalb von Zellen**. Ihre Aufgaben sind teilweise noch unklar.

2 **Nanotubes** verbinden Zellen untereinander und könnten zum Transport von Stoffen oder Signalen dienen. **Molekulare Fabriken** in Form zusammengeballter Enzyme und Mikrokompartimente spielen wohl eine wichtige Rolle im Stoffwechsel der Zelle.

3 **Exosomen** hoffen Forscher zum gezielten Transport von therapeutischen Wirkstoffen einsetzen zu können. Schließlich entdeckten Wissenschaftler in Zellen auch riesige **Proteinfäden** aus Tausenden von Enzymen des gleichen Typs.

Einer Untersuchung von Gerdes und seinen Kollegen aus dem Jahr 2010 zufolge leiten die Membranröhrchen auch elektrische Impulse. Auf diese Weise könnten sich Zellen untereinander koordinieren, etwa wenn sie zu ihrem Bestimmungsort wandern oder bei der Wundheilung. Selbst Viren wie HIV oder Prionen – falsch gefaltete infektiöse Proteine – könnten sich auf diese Weise ausbreiten.

Manche Forscher bezweifeln allerdings, dass es sich bei Nanotubes tatsächlich um Kanäle handelt. »Es ist nicht eindeutig bewiesen, dass sie eine durchgängige Röhre bilden«, meint etwa Jennifer Lippincott-Schwartz, Zellbiologin an den National Institutes of Health in Bethesda. Zudem wurden die Strukturen bisher hauptsächlich in Zellkulturen untersucht. Es wäre aufschlussreich, ihre Entstehung in lebenden Organismen experimentell zu blockieren, erklärt Davis. Das Problem: Oft stören solche Manipulationen darüber hinaus lebenswichtige Vorgänge in den Zellen.

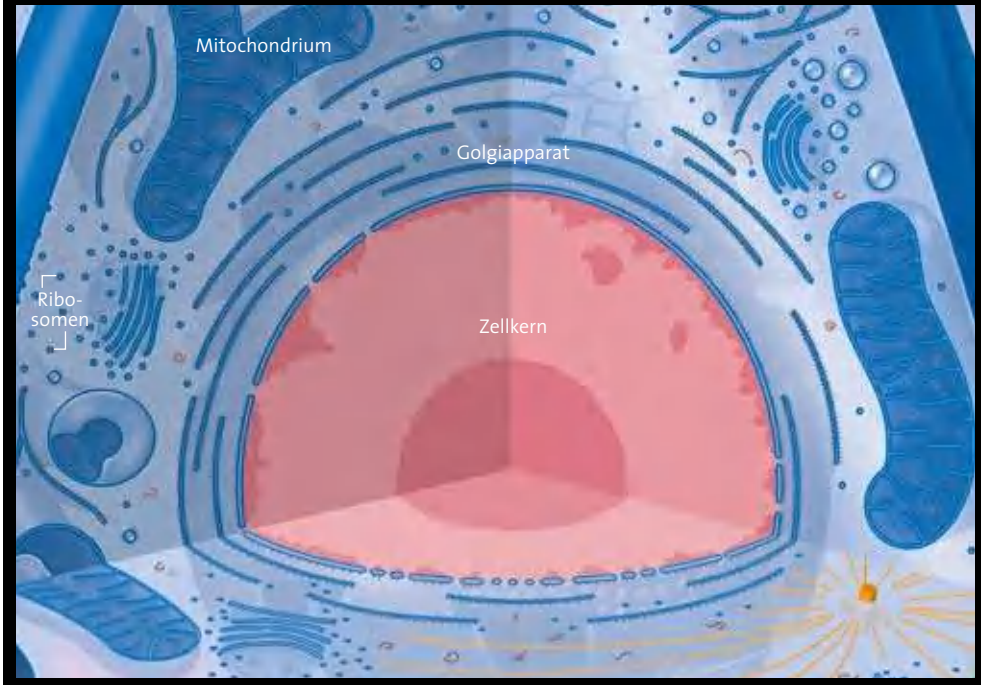
Miniaturfabriken im Zytoplasma

Andere Zellstrukturen könnten dafür sorgen, dass Stoffwechselvorgänge effizienter ablaufen. Denn: Befänden sich die beteiligten Proteine nicht sehr nahe beieinander, würden Zwischenprodukte in dem »unglaublichen Wirrwarr von Enzymen im Zellinneren vermutlich verloren gehen«, glaubt der Biochemiker Stephen Benkovic von der Pennsylvania State University. Dass sich Proteine oft zu Aggregaten anordnen, um bestimmte Aufgaben zu erfüllen, wissen Forscher schon länger. So ist zum Beispiel ein großer Enzymkomplex für das Kopieren von DNA zuständig.

Doch Benkovic und andere Wissenschaftler spekulieren, dass sich auch Stoffwechselenzyme in einer Art vielstufiger Fließbandproduktion zusammenfinden, in der möglicherweise instabile Moleküle sicher von einem Zwischenschritt zum nächsten gelangen. Tatsächlich fand Benkovics Arbeitsgruppe Hinweise auf eine solche Stoffwechselfabrik, die einen Vorläufer von Purinnukleotiden synthetisiert – das sind wichtige Bestandteile der DNA und RNA. Das Team markierte jedes einzelne der beteiligten Enzyme mit einem Fluoreszenzfarbstoff und beobachtete ihr Verhalten in lebenden Zellen unter dem Mikroskop. Bei Purinmangel in den Zellen lagerten sich die Einzelproteine zu Komplexen zusammen. Diese »Purinosomen« sind in einem dichten Geflecht aus Proteinfasern eingebettet: den Mikrotubuli. Ihre Produkte lassen sich in den zellulären Energieträger Adenosintriphosphat umwandeln. Daher spekuliert Benkovic, dass die Minifabriken Energie bereitstellen, die für den Transport von Organellen und Materialien innerhalb der Zelle entlang der Mikrotubuli gebraucht wird.

Edward Marcotte, ein Systembiologe an der University of Texas in Austin, mahnt jedoch zur Vorsicht beim Interpretieren solcher Beobachtungen. Gemeinsam mit Kollegen fand er 180 verschiedene Typen von Proteinaggregaten in Hefezellen, die zuvor unter nährstoffarmen Bedingungen gewachsen waren. Es sei jedoch unklar, sagt Marcotte, ob diese Cluster einen Zweck erfüllen – etwa indem sie die Stoffwechseleffizienz steigern oder als Vorratslager dienen – oder ob sie lediglich auf Fehlfunktionen wegen der schlechten Versorgung zurückzuführen sind.

Einige Wissenschaftler untersuchen wiederum so genannte Mikrokompartimente bei Bakterien. Diese polyederförmigen Proteinkapseln sind bereits seit rund 50 Jahren bekannt und ähneln den Hüllen einfach gebauter Viren. Doch während Letztere genetisches Material enthalten, befinden sich in den Mikrokompartimenten Enzyme, die wichtige biochemi-



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ART FOR SCIENCE

Unvollständiges Bild
Eine typische Lehrbuchzeichnung des Zellinneren zeigt neben dem Kern (im Bild rot) verschiedene Organellen wie Mitochondrien, Golgiapparat und Ribosomen. Doch inzwischen haben Biologen darüber hinaus noch viele weitere intrazelluläre Strukturen entdeckt – und laufend werden es mehr.

sche Reaktionen durchführen. Beispielsweise wandeln sie in so genannten Carboxysomen Kohlendioxid in Kohlenstoffverbindungen um, die für die Zelle nutzbar sind. Die Proteinkapseln könnten verschiedene Aufgaben erfüllen: die Effizienz der Reaktionen steigern, schädliche Zwischenprodukte vom Rest der Zelle isolieren und die Enzyme vor Substanzen schützen, die ihre Arbeit beeinträchtigen.

Im Jahr 2005 klärten Proteinkristallografen die Detailstruktur der Kapseln auf. Todd Yeates von der University of California in Los Angeles fand gemeinsam mit Kollegen heraus, dass sich einige der beteiligten Kapselproteine zu den flachen sechseckigen Wänden des Containers zusammenlagern. Jede dieser »Kacheln« weist in der Mitte eine Öffnung auf, durch die kleinere Moleküle hindurchschlüpfen können.

Mikrokompartimente lagern sich darüber hinaus auch in Reihen aneinander. Pamela Silver, Professorin für synthetische Biologie an der Harvard Medical School in Boston, berichtete gemeinsam mit Kollegen 2010, dass die Carboxysomen bei Zyanobakterien annähernd gleichmäßig entlang einer Linie durch die lang gestreckte Zelle angeordnet sind. Dadurch erhält bei der Teilung jede der Tochterzellen etwa gleich viele Carboxysomen.

Einige Biologen versuchen nun, Mikrokompartimente für industrielle Zwecke zu nutzen, indem sie verschiedene Enzyme hineinpacken. Zum Beispiel planen Yeates und sein Team, Biokraftstoffe in den Containern herzustellen. Anderen Forschern gelang es bereits, fluoreszenzmarkierte Enzyme aus anderen Organismen in die Kapseln zu bringen. Es ist also offenbar möglich, den Inhalt der Enzymbehälter zu verändern.

Noch sind Mikrokompartimente ein wenig erkundetes Forschungsgebiet. So wissen die Forscher kaum etwas darüber, wie die Enzyme im Inneren der Kapseln angeordnet sind, sagt Chery Kerfeld, Strukturbiologin am kalifornischen Lawrence Berkeley National Laboratory. »Wir haben keine Ahnung, wie es da drinnen aussieht.«

Transportkapseln – nicht Müllsäcke!

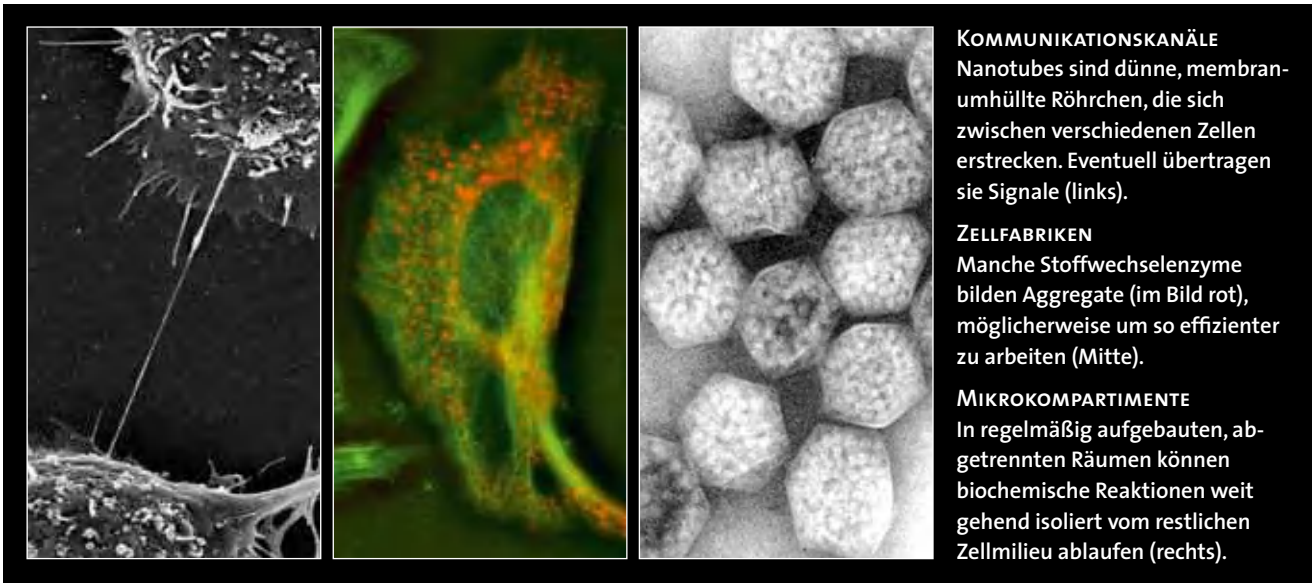
Auch Exosomen ziehen inzwischen vermehrt die Aufmerksamkeit der Forscher auf sich. Zellen bilden diese kleinen, membranumhüllten Bläschen in ihrem Inneren und spucken sie dann aus. Entdeckt wurden sie bereits in den 1980er Jahren, blieben dann aber für rund ein Jahrzehnt völlig unbeachtet – weil die Forscher sie lediglich für eine Art zellulärer Müllsack hielten. Das Interesse daran nahm 1996 schlagartig zu, als die Zellbiologin Graça Raposo und ihre Mitarbeiter vom Institut Curie und dem Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) in Paris Exosomen untersuchten, die von B-Zellen – bestimmten Immunzellen – stammten. Das Team arbeitete mit dem Elektronenmikroskop, das damals nicht besonders beliebt war, »einfach weil es als altmodisch galt«, sagt Raposo. Doch unter anderem mit dieser althergebrachten Technik gelang es ihr nachzuweisen, dass die unscheinbaren Membranbläschen durchaus eine wichtige Aufgabe erfüllen: Sie präsentieren an ihrer Oberfläche Proteinbruchstücke von Krankheitserregern und regen dadurch Immunzellen zu Abwehrreaktionen an.

2007 machte eine Entdeckung des Teams um den Allergologen Jan Lötvall von der Universität Göteborg in Schweden die Sache noch spannender. Die Forscher berichteten, dass Exosomen Boten-RNA transportieren. Andere Zellen nehmen diese auf und nutzen sie als Bauanleitung für die Syn-

W I S wissenschaft in die schulen!

Didaktische Materialien für den Unterricht zum Thema »Zellen« kostenfrei herunterladen unter:

www.wissenschaft-schulen.de/zellen

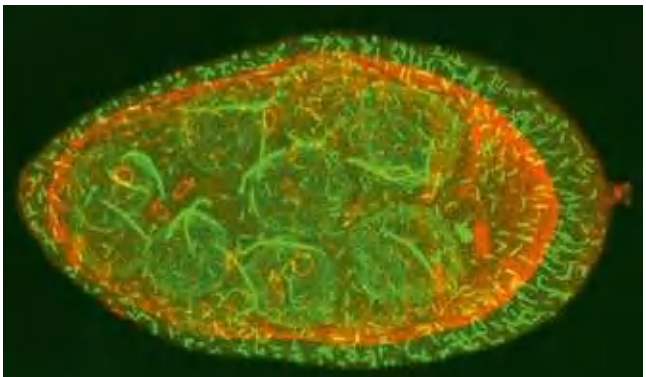


Kommunikationskanäle
Nanotubes sind dünne, membranumhüllte Röhrchen, die sich zwischen verschiedenen Zellen erstrecken. Eventuell übertragen sie Signale (links).

Zellfabriken
Manche Stoffwechselenzyme bilden Aggregate (im Bild rot), möglicherweise um so effizienter zu arbeiten (Mitte).

Mikrokompartimente
In regelmäßig aufgebauten, abgetrennten Räumen können biochemische Reaktionen weit gehend isoliert vom restlichen Zellmilieu ablaufen (rechts).

LINKS: RUSTOM, A. ET AL.: NANOTUBULAR HIGHWAYS FOR INTERCELLULAR ORGANELLE TRANSPORT. IN: SCIENCE 303, S. 1007–1010, 2004, FIG. 1F. MIT FRDL. GEN. VON HANS-HERMANN GERDES; ABDRUCK GENEHMIGT VON AAAS / CCC. MITTE: AN, S. ET AL.: MICROTUBULE-ASSISTED MECHANISM FOR FUNCTIONAL METABOLIC MACROMOLECULAR COMPLEX FORMATION. IN: PNAS 107, S. 12872–12878, 2010, FIG. 3C. MIT FRDL. GEN. VON STEPHEN J. BERKOVIC; ABDRUCK MIT FRDL. GEN. VON PNAS PERMISSIONS. RECHTS: TANAKA, S. ET AL.: ATOMIC-LEVEL MODELS OF THE BACTERIAL CARBOXYSOME SHELL. IN: SCIENCE 319, S. 1083–1086, 2008, FIG. 1B. MIT FRDL. GEN. VON TODD O. YEATES; ABDRUCK GENEHMIGT VON AAAS / CCC



NOREE C. ET AL.: IDENTIFICATION OF NOVEL FILAMENT-FORMING PROTEINS IN SACCHAROMYCES CEREVISIAE AND DROSOPHILA MELANOGASTER. IN: JOURNAL OF CELL BIOLOGY 190, S. 541–551, 2010; FIG. 3B. MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON JAMES E. WILHELM, ABDRUCK MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON RUPF PERMISSIONS

Zellschlangen
Manche Enzyme bilden lange Filamente. Diese können als Gerüststrukturen dienen, aber auch zur Regulation biochemischer Reaktionen im großen Maßstab.

these von Proteinen. Die vermeintlichen Müllbeutel übermitteln demnach wichtige Informationen zwischen Zellen.

Nun möchten Wissenschaftler die Exosomen nutzen, um therapeutische Wirkstoffe gezielt an bestimmte Stellen des Körpers zu transportieren. Sie hoffen, dass die natürlich gebildeten Partikel seltener toxisch wirken oder eine Immunreaktion auslösen als andere Vehikel, etwa künstliche Lipidbläschen und Proteinhüllen. Letztes Jahr berichtete der Neurowissenschaftler Matthew Wood von der englischen University of Oxford zusammen mit Kollegen über einen erfolgreichen Versuch mit Mäusen: Die Forscher stellten Exosomen her, die mit Hilfe eines künstlich eingeführten Moleküls auf ihrer Oberfläche speziell an Nervenzellen andocken. Diese Vehikel beluden sie mit RNA, die in den Zielzellen die Produktion des Enzyms Beta-Sekretase hemmen sollte, das an der Entstehung der Alzheimerdemenz beteiligt ist. Tatsächlich lieferten die Partikel ihre RNA-Fracht wie geplant bei den Neuronen ab und bremsten dort die Synthese des Proteins ohne erkennbare schädliche Effekte. Andere Forscher versuchen, Exosomen aus Körperflüssigkeiten zu isolieren und ihren Inhalt zu analysieren, um so Krebserkrankungen zu diagnostizieren – oder aber mit Hilfe der Membransäckchen Immunreaktionen gegen Tumoren auszulösen.

Proteinfäden als Regulationsmittel

Mehrere Forschergruppen entdeckten inzwischen auch riesige Proteinfäden, die aus Hunderten oder gar Tausenden von Enzymmolekülen bestehen und manchmal die gesamte Zelle durchspannen. So identifizierte das eingangs erwähnte Team um Jim Wilhelm unter anderem die CTP-Synthase, die einen wichtigen Baustein für DNA und RNA liefert, als solches filamentbildendes Enzym in Hefe. Zwei andere Arbeitsgruppen fanden ungefähr gleichzeitig CTP-Synthase-Filamente bei Taufliegen und Bakterien. Einer der beteiligten Forscher, der Zellbiologe Ji-Long Liu von der University of Oxford, bezeichnete sie als Cytoophidia (»Zellschlangen«) – wegen ihrer schlangenförmigen Gestalt in Taufliegenzellen. Wilhelm vermutet, dass andere Wissenschaftler dieselben Filamente bereits in den 1980er Jahren entdeckten, aber das Protein, aus dem sie bestehen, nicht identifizierten.

Solche Proteinaggregate könnten Zellen erlauben, große Mengen eines Enzyms schlagartig an- und auszuschalten, spekuliert Wilhelm. Falls etwa die Moleküle innerhalb eines Filaments inaktiv wären, könnte die Zelle sie aktivieren, indem sie einfach den ganzen Strang auflöst.

Bei einigen Bakterien erfüllen derartige Fäden anscheinend auch strukturelle Aufgaben, wie sie die Aktinfilamente als Teil des Zytoskeletts in komplexeren Zellen übernehmen. Wie Zemer Gitai und seine Kollegen von der Princeton University in New Jersey herausfanden, kontrollieren CTP-Synthase-Filamente das Ausmaß der Krümmung des kommaförmigen Bakteriums *Caulobacter crescentus*. Zellen mit zu wenig CTP-Synthetase rollen sich eng zusammen, während solche, in denen ein Überschuss herrscht, eine lang gestreckte Form annehmen. Das lässt darauf schließen, dass *C. crescentus* die Enzymfilamente dazu nutzt, die korrekte Gestalt zu erhalten. Allerdings ist noch unklar, welche Bedeutung die gebogene Form für das Bakterium hat.

Einige Wissenschaftler vermuten inzwischen, dass Aktin dem Enzym Glukokinase ähnelt, das eine wichtige Rolle bei der biologischen Energiegewinnung durch Abbau von Traubenzucker spielt. Sollte dies zutreffen, könnte das Zellskelett aus Filamenten entstanden sein, die ursprünglich den Stoffwechsel regulierten, erklärt Gitai.

Obwohl die Aufgaben dieser vielfältigen, faszinierenden Strukturen noch nicht alle bekannt sind, ist es also nach wie vor ein spannendes und lohnendes Unterfangen, Zellen und ihren inneren Aufbau genauer zu untersuchen. ~

DIE AUTORIN

Roberta Kwok ist freie Journalistin und lebt in Burlingame, Kalifornien.

QUELLEN

Alvarez-Erviti, L. et al.: Delivery of siRNA to the Mouse Brain by Systemic Injection of Targeted Exosomes. In: Nature Biotechnology 29, S. 341–345, 2011

Noree, C. et al.: Identification of Novel Filament-Forming Proteins in Saccharomyces Cerevisiae and Drosophila Melanogaster. In: Journal Cell Biology 190, S. 541–551, 2010

Rustom, A. et al.: Nanotubular Highways for Intercellular Organelle Transport. In: Science 303, S. 1007–1010, 2004

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1159806**

© Nature Publishing Group

www.nature.com
Nature 480, S. 26–28, 1. Dezember 2011

Warten auf die Katastrophe

Forscher haben veränderte Vogelgrippeviren erzeugt, die sich von Mensch zu Mensch verbreiten könnten. Nun debattieren Experten über die Freiheit und Verantwortung der Wissenschaft.

Von Fred Guterl

Im Frühjahr 1983 brach auf Geflügelfarmen im Osten Pennsylvanias die Vogelgrippe aus. Tiermediziner hatten das verursachende Virus zunächst als relativ harmlos eingestuft, doch während der Erreger sich in den Zuchtbetrieben ausbreitete, entstand ein neuer Virusstamm. Zahlreiche Tiere starben daran, und die Farmer begannen, um ihre Existenz zu bangen. In ihrer Not bat die Regierung Pennsylvanias das US-Landwirtschaftsministerium um Hilfe, worauf die Behörde Experten entsendete, die in einer Einkaufsmeile außerhalb der Stadt Lancaster eine Zentrale einrichteten. Um die Epidemie einzudämmen, ließ das Ministerium in den Gegenden von Pennsylvania bis Virginia insgesamt 17 Millionen Vögel töten.

Zu dieser Zeit traf Yishihiro Kawaoka, ein junger Wissenschaftler aus Japan, in den USA ein und begann am St. Jude Childrens Research Hospital in Memphis zu forschen. Sein Chef, der Virologe Robert Webster, vermutete, dass menschliche Grippeerreger aus Vogelviren entstehen. Seiner These zufolge kursieren die Vorläuferviren unter Enten und Gänsen, ohne für uns gefährlich zu sein – bis irgendwann ein Stamm aus ihnen entsteht, der sich in den oberen Atemwegen des Menschen vermehren kann. Webster meinte, man müsse erst die Vogelgrippe besser verstehen, bevor man die Influenza beim Menschen effektiver bekämpfen könne. Als er im November 1983 erfuhr, dass die Geflügelseuche in Pennsylvania bedrohliche Dimensionen annahm, ließ er alles stehen und liegen und eilte ins Zentrum der Epidemie.

Kawaoka blieb derweil in Memphis, um Proben zu untersuchen, die er aus dem Seuchengebiet erhalten hatte. Er extrahierte daraus die Viren und züchtete sie im Labor. Dann infizierte er damit gesunde Hühner und wartete ab, was passieren würde. Das schockierende Ergebnis: Sämtliche infizierten Tiere starben – eine Mortalitätsrate von hundert Prozent. Als Kawaoka die verendeten Tiere untersuchte, stellte er fest, dass der Erreger beinahe alle Organe angegriffen hatte, ähnlich wie es manche Stämme des Ebolavirus beim Menschen tun.

Warum waren die Viren noch im April 1983 harmlos gewesen und hatten sich bis zum November in Killer verwandelt? Bei einem genauen Vergleich entdeckte Kawaoka, dass zwischen den Stämmen vom April und November nur minimale Unterschiede bestanden. »Tatsächlich war die neue, brandgefährliche Virusvariante infolge einer einzigen Mutation entstanden«, erinnert er sich heute. »Das bedeutet, dass hochpathogene Influenzaviren jederzeit unvermittelt auftauchen können.«

Kawaoka erkannte: Die Wissenschaftler mussten dringend mehr darüber herausfinden, unter welchen Umständen die Vogelgrippe für Menschen gefährlich werden kann. Nur dann wäre es möglich, bedrohliche Entwicklungen früh zu erkennen und rechtzeitig mit Impfungen und anderen Maßnahmen gegenzusteuern. Besonders interessierte ihn, ob ein tödliches Vogelgrippevirus wie jenes, das 1983 auf den Hühnerfarmen wütete, auch auf den Menschen überspringen könnte – und wie sich das Erbgut des Erregers hierfür verändern müsste.

Erst drei Jahrzehnte später fand der japanische Forscher eine Antwort. Er fusionierte ein Vogelgrippevirus vom Typ H5N1 mit einem Schweinegrippevirus vom Typ H1N1. Mit dem entstehenden Hybriderreger infizierte er Frettchen, die in der Influenzaforschung oft als menschenähnliches

AUF EINEN BLICK

UMSTRITTENE VIRENEXPERIMENTE

1 Vögel sind natürliche Wirte von **Influenzaviren**, die gelegentlich auf den Menschen überspringen. Vor allem Virusstämme vom Typ H5N1 wiesen bisher eine hohe **Mortalitätsrate** auf, wenn sie Menschen infizierten. Die Opfer hatten meist direkten Kontakt zu Vögeln.

2 Nach den Attentaten vom 11. September 2001 hat die US-Regierung ihre Ausgaben **für biologische Sicherheit** massiv erhöht. Mit den Geldern konnten Wissenschaftler unter anderem **künstlich veränderte H5N1-Viren** erzeugen, die auch unter Säugern übertragbar sind.

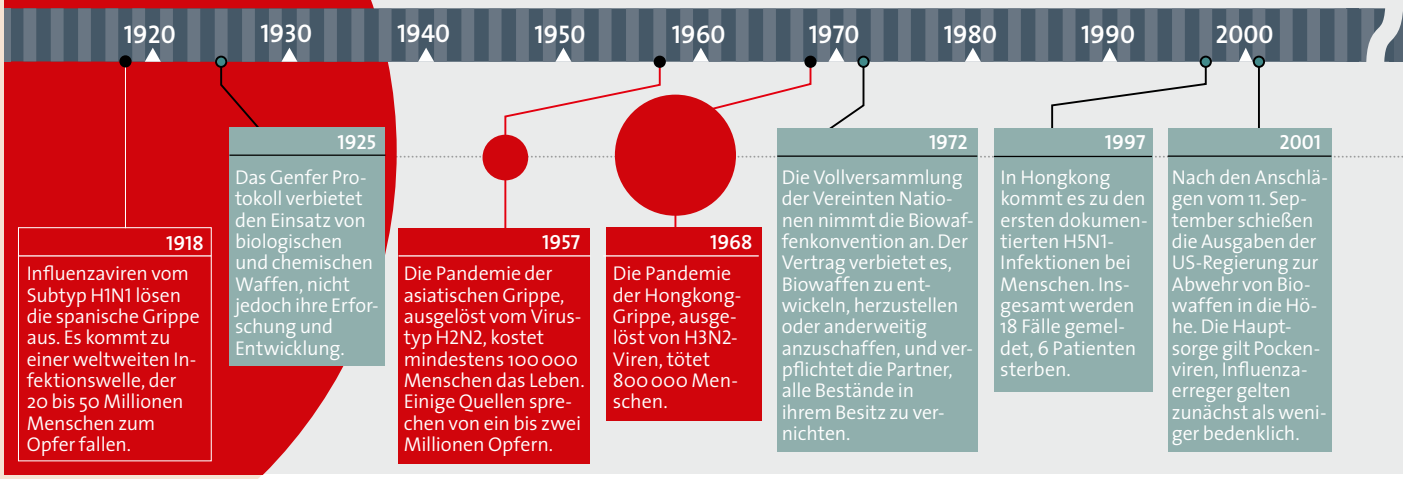
3 Kritiker argumentieren, die modifizierten H5N1-Stämme seien eine Gefahr, und verlangen strengere Auflagen für entsprechende Studien. Befürworter meinen, die **Forschung über gefährliche Viren** helfe, bedrohliche Entwicklungen in der Natur rechtzeitig zu erkennen – und eine Reglementierung solcher Untersuchungen schade mehr, als sie als nütze.

Könnte ein im Labor erzeugter Vogelgrippeerreger, der von Mensch zu Mensch übertragen wird, bei einer Pandemie ähnlich viele Opfer fordern wie eine Atombombe?

KYLE BEAN UND SAM HOFMAN

Evolution einer Biowaffe

Influenzaviren haben immer wieder Pandemien ausgelöst. Seit den 1990er Jahren kam es unter Zuchtgeflügel in Asien wiederholt zu Masseninfektionen mit dem Subtyp H5N1. Experten befürchten, dass ein solcher Vogelgrippeerreger die Fähigkeit erlangen könnte, von Mensch zu Mensch zu springen. Die Schweinegrippe-Pandemie im Jahr 2009 hat deutlich gemacht, wie schnell sich Influenzaviren, in diesem Fall des Typs H1N1, in der Bevölkerung verbreiten können. Bei solchen Ansteckungsraten haben die Gesundheitsbehörden nur wenig Zeit zu reagieren.



ROTE KREISE: RELATIVE ZAHL DER PANDEMIE-TODESOPFER

Tiermodell dienen. Später beobachtete er, dass das Virus mittels Tröpfcheninfektion von Tier zu Tier übersprang.

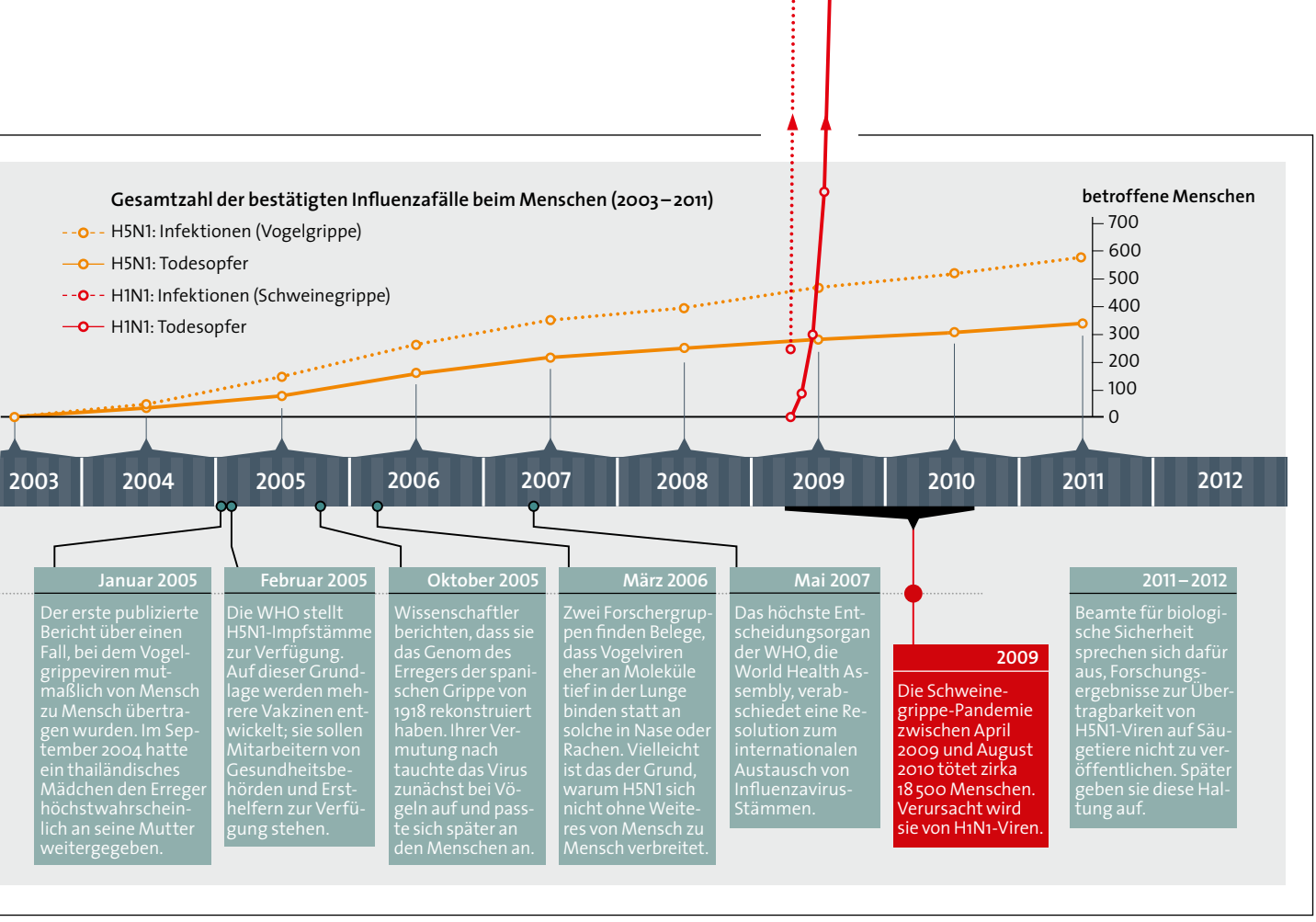
Dieses Ergebnis sprach dafür, dass aus Vogelgrippeviren des Typs H5N1 tatsächlich Erreger hervorgehen können, die sich von Mensch zu Mensch verbreiten. Kawaoka reichte seine Ergebnisse zur Veröffentlichung bei der Fachzeitschrift »Nature« ein.

Unabhängig davon war es auch dem Virologen Ron Fouchier vom Erasmus Medical Center in Rotterdam gelungen, H5N1-Viren zu erzeugen, die potenziell auf Menschen übertragbar sind. Fouchiers Arbeitsgruppe hatte Frettchen mit genetisch veränderten Viren infiziert, die bestimmte Anpassungen an Säugetierwirte zeigten. Nach mehrmaliger Übertragung auf Artgenossen hatten die Erreger schließlich die Fähigkeit erlangt, sich per Tröpfcheninfektion unter den Tieren zu verbreiten. Nun wollte Fouchier seine Arbeit im Fachjournal »Science« publizieren.

Doch die amerikanische Regierung erfuhr von den Studien. Im Dezember 2011 drängten US-Beamte für biologische Sicherheit auf einen Aufschub der Veröffentlichungen und verlangten ein Forschungsmoratorium. Sie waren besorgt, dass eines der künstlich erzeugten Viren für Menschen ähnlich tödlich sein könnte wie das Vogelgrippevirus von 1983 für Hühner. In diesem Fall könnten die Forschungsergebnisse dazu missbraucht werden, biologische Waffen herzustellen. Denkbar erschien auch, dass ein solches Virus unbeabsichtigt aus dem Labor entweicht, indem es einen Mitarbeiter infiziert. Experten begannen öffentlich darüber zu streiten, wie gefährlich die neuen Erreger für Menschen seien und unter welchen Auflagen die Arbeit mit H5N1-Influenzaviren erfolgen müsse. Ein Grundsatzkonflikt brach auf: Die wissenschaftliche Praxis, die von freier Forschung und intensivem Informationsaustausch profitiert, kollidierte mit der Notwendigkeit, die Menschheit vor potenziellen Massenvernichtungswaffen zu schützen.

Die erste dokumentierte »Geflügelpest« wütete 1878 auf Hühnerfarmen in einem ländlichen Bezirk Norditaliens. Zunächst dachte man, es handle sich um eine besonders aggressive Form der Cholera. Erst 23 Jahre später gelangte man zu der Erkenntnis, dass Viren die Ursache gewesen sein mussten. 1955 erkannten Wissenschaftler: Der Erreger gehörte zu den Influenza-A-Viren und besaß Ähnlichkeiten mit Grippeviren des Menschen. Das brachte den Virologen Robert Webster wenig später zu der Vermutung, es könnte einen Zusammenhang zwischen Influenzaerkrankungen bei Vögeln und Menschen geben.

Websters These, dass Vögel ein Reservoir für Vorläufer von humanpathogenen Viren darstellen, gilt heute als gesichert. Im Magen-Darm-Trakt von Wildvögeln überdauern Influenzaviren, die ihre Wirte zwar nicht krank machen, aber über die Ausscheidungen der Tiere verbreitet werden. Infizieren sich damit Hühner auf einem Bauernhof oder in einer Geflügelfarm, so gelangt der Erreger oft auch in engen Kontakt mit Schweinen und weiteren Nutztieren, wodurch er mit zahlreichen anderen Viren in Wechselwirkung tritt. Genau dies ge-



JEN CHRISTIANSEN, NACH: WHO (INFLUENZAFÄLLE BEIM MENSCHEN), ZEITLEISTE NACH: H5N1 AVIAN INFLUENZA - TIMELINE OF MAJOR EVENTS, WHO 13. DEZ. 2011

schieht auf Tiermärkten und kleinen Höfen in China und Südasien. Influenzaviren sind bekannt dafür, dass sie sich genetisch häufig verändern – nicht nur durch Mutationen, sondern auch mittels Gentransfer von anderen Viren. Wenn unterschiedlichste Nutztiere engen Kontakt zueinander haben, kommt es zu einem intensiven Austausch von Erbmaterial zwischen ihren Krankheitserregern. Deshalb konzentrierte sich die Aufmerksamkeit von Influenzaforschern in den vergangenen Jahrzehnten auf H5N1-Stämme auf Geflügelfarmen Asiens.

Unvermittelt zum Killer geworden

Influenza-A-Viren lassen sich anhand der Typen ihrer Oberflächenproteine Hämagglutinin und Neuraminidase einteilen – daher das »H« und das »N« in der Virusbezeichnung. Der Geflügelseuchenerreger von 1983 beispielsweise war vom Typ H5N2. Könnte man Viren menschliche Charaktermerkmale zuschreiben, wäre H5N1 als rastlos und unberechenbar zu bezeichnen. So rief er in Wildvögeln lange Zeit keine ernsthaften Krankheitssymptome hervor. Doch 2005 veränderte er sich offenbar plötzlich und löste am Qinghai-See in China eine Epidemie aus, bei der tausende Enten, Gänse, Möwen und Kormorane verendeten. Innerhalb der vergangenen zehn Jahre infizierte er zudem Zibetkatzen in Vietnam und Tiger in einem thailändischen Zoo – mit tödlichen Folgen.

Auch Menschen fielen ihm zum Opfer. Während eines Vogelgrippeausbruchs 1997 in Asien starb ein dreijähriger Junge in Hongkong. Das war der erste dokumentierte menschliche Todesfall im Zusammenhang mit H5N1. Bis Ende des Jahres stieg die Zahl der Toten auf sechs. Um die Epidemie einzudämmen, ordneten die Regierungsbehörden Chinas und seiner Nachbarländer die vorsorgliche Tötung von Millionen Zuchtvögeln an. Dennoch kam es 2004 zu neuen Ausbrüchen in Thailand, Vietnam, China und Indonesien. Alles in allem sind bis heute etwa 360 Fälle dokumentiert, bei denen Menschen an H5N1-Infektionen starben; die meisten von ihnen hatten vorher engen Kontakt zu Vögeln. Das klingt zwar nach nicht sehr viel, jedoch liegt die Mortalitätsrate einer solchen Infektion nach Angaben der Weltgesundheitsorganisation WHO bei 60 Prozent. Zum Vergleich: Der Erreger der spanischen Grippe von 1918, die 20 bis 50 Millionen Menschen das Leben kostete, hatte eine Mortalitätsrate von zwei bis drei Prozent.

Im vergangenen Herbst wurden die Arbeiten von Kawaoka und Fouchier dann doch publiziert. Seither diskutieren Wissenschaftler darüber, wie oft H5N1-Infektionen beim Menschen tatsächlich tödlich verlaufen. Einige Experten, allen voran Peter Palese, Leiter des Fachbereichs Mikrobiologie an der Mount Sinai School of Medicine in New York, vermuten, dass milde Verläufe von H5N1-Infektionen oft unerkannt bleiben – mit der Folge einer zu hoch eingeschätzten Sterblichkeitsrate. Andere meinen, dass durch H5N1 verursachte Todesfälle mitunter nicht dokumentiert würden, was die Mortalitätsrate niedriger erscheinen ließe, als sie tatsächlich ist. Kawaoka und Fouchier beobachteten in ihren Experi-

menten, dass nur wenige Frettchen, die mit künstlich veränderten H5N1-Viren infiziert wurden, daran starben. Wir kennen die Gefahr, die von diesen Erregern ausgeht, also nur ungenau. Doch dass H5N1 das Potenzial besitzt, sich von Mensch zu Mensch zu verbreiten, ist Besorgnis erregend.

Im September 2001 verschickten Terroristen Sporen des Milzbranderregers *Bacillus anthracis* per Post in den USA. Fünf Menschen starben an den Infektionen – eine Anschlagsserie, die Angst und Schrecken verbreitete, zumal die amerikanische Bevölkerung nach den Angriffen vom 11. September 2001 ohnehin verunsichert war. Die US-Regierung erhöhte ihre Ausgaben für Biowaffenabwehr daraufhin massiv. Seit 2001 hat sie hier mehr als 60 Milliarden Dollar investiert – in das Einlagern von Impfstoffen, die Überwachung von Krankheitsfällen und die Grundlagenforschung an potenziellen Biowaffen wie dem Influenzavirus. Das National Institute of Allergy and Infectious Deseases (NIAID), der Hauptgeldgeber in diesem Bereich, verdreifachte das Budget für Influenzaforschung 2003 von 17 Millionen auf 50 Millionen Dollar und verdoppelte es im Folgejahr noch einmal auf 100 Millionen Dollar. 2009 erreichten die Ausgaben einen Rekordwert von 300 Millionen Dollar. Auch Kawaoka profitierte davon: Seit 2006 hat er nach Angaben der National Institutes of Health (NIH) jährlich rund 500 000 Dollar für Forschungen über das pandemische Potenzial von H5N1-Influenzaviren erhalten. Fouchier bekam seine Forschungsgelder ebenfalls im Rahmen einer Förderung durch das NIAID.

Allerdings überwog nach dem 11. September zunächst die Befürchtung, dass Pockenviren als Biowaffen verwendet werden könnten. Denn eine Infektion damit führt in jedem dritten Fall zum Tod, zudem können die Erreger jahrelang in Wirtspopulationen ausharren. Das Pockenvirus gilt seit 1979 als ausgerottet, Proben davon werden nach offiziellen Angaben an nur zwei Orten unter Verschluss aufbewahrt: in Atlanta (USA) und in Koltsovo (Russland). Es gibt jedoch hartnäckige Gerüchte über weitere, illegale Proben. Deshalb beschafften die USA nach dem 11. September etwa 300 000 Dosen Pockenimpfstoff, die nun an geheimen Orten gelagert werden.

Influenzaviren kamen im Jahr 2005 auf die Biowaffenagenda. Wissenschaftlern war es gelungen, das Virus der Grippepandemie von 1918 zu rekonstruieren, und zwar aus Gewebeproben von menschlichen Überresten, die im arktischen Permafrostboden überdauert hatten. Einige Experten äußerten Bedenken, ob solche Forschungen nicht zu viele Sicherheitsrisiken aufwerfen – unter ihnen Paul Keim, der Vorsitzende des National Science Advisory Board for Biosecurity der USA (NSABB). Ihre Befürchtungen haben sich inzwischen

Ein unberechenbarer Erreger

Das Vogelgrippevirus H5N1 hat viele mysteriöse Eigenschaften. Es ist weit verbreitet, aber schwer nachzuweisen. Es tötet mutmaßlich mehr als die Hälfte der infizierten Menschen – doch Tausende, die mit dem Virus in Kontakt kamen, wurden offenkundig in keiner Weise beeinträchtigt. Es scheint nur noch wenige Mutationen davon entfernt, sich von Mensch zu Mensch zu verbreiten – doch trotz jahrzehntelanger, rasch fortschreitender Evolution hat es diese Befähigung bislang nicht erworben. Die fünf größten Rätsel von H5N1:

1 Warum ist das Virus derart erfolgreich?

Es gibt viele verschiedene H5N1-Stämme. Der hochpathogene Stamm, der den Forschern die größten Sorgen bereitet, tauchte erstmals 1996 auf. Seine Bezeichnung »Gs/Gd« rührt daher, dass er zunächst in domestizierten Gänsen in der chinesischen Provinz Guangdong nachgewiesen wurde. Von dort sprang er auf Wildvögel zurück – ein sehr ungewöhnliches Verhalten. Der Erreger hat sich weltweit verbreitet und kann auch Säugetiere einschließlich des Menschen infizieren. Am stärksten betroffen ist Ägypten: Seit 2009 gab es dort die meisten Krankheitsfälle in der Bevölkerung. Die Fähigkeit des Virus, Artgrenzen zu überwinden, ist vermutlich eine Anpassung an die Verhältnisse auf chinesischen Bauernhöfen und Tiermärkten. Hier kommen viele potenzielle Wirtsorganismen in engen Kontakt miteinander.

2 Wo zirkuliert das Virus derzeit?

Wildvögel sind ein Reservoir, doch da in der Regel nur wenige Tiere erkranken, ist das Virus schwer nachzuweisen. Wie verbreitet es unter Menschen ist, weiß niemand. Zudem gibt es kaum Erkenntnisse darüber, wie das menschliche Immunsystem auf den Erreger reagiert und unter welchen Umständen es zur Ansteckung kommt. Einige Forscher meinen, dass das Virus sehr viele Menschen infiziert, in den meisten Fällen aber nur milde oder gar keine Symptome auslöst. Andere halten das für unwahrscheinlich, da dann viel mehr leichte Krankheitsverläufe diagnostiziert werden müssten.

3 Was macht das Virus so tödlich?

H5N1 trägt mehrere Mutationen in seinen drei Polymerasegenen, die es ihm erlauben, sich in den infizierten Organismen aggressiv zu vervielfältigen. In Frettchen, Mäusen und Vögeln befällt es nicht nur Lunge und Darm, sondern auch andere Organe wie das Gehirn. Bei Menschen scheint es bislang hauptsächlich Atemwegsprobleme zu verursachen. Das Virus kann eine massive Immunantwort mit überschießenden Entzündungsreaktionen auslösen, die zum Lungenversagen führen.

Rätselhaft bleibt, warum schwere Krankheitsfälle so selten auftreten. Die weitaus meisten Personen, die massiv mit dem Vi-

zwar relativiert, da die Schweinegrippe-Pandemie von 2009 einem großen Teil der Weltbevölkerung zumindest teilweise Immunität gegen das (weit aggressivere) Virus von 1918 verlieh. H5N1-Viren jedoch sind dem menschlichen Immunsystem unbekannt, daher gibt es keine natürliche Resistenz gegen diesen Typ.

Infektionswelle im Eiltempo

Mittlerweile gehen viele Verteidigungsspezialisten davon aus, dass die von Kawaoka und Fouchier hergestellten Viren potenziell gefährlicher sind als Pockenerreger. Denn die Influenza ist deutlich ansteckender und verbreitet sich schneller in der Bevölkerung. Dadurch haben die zuständigen Behörden weniger Zeit, um Impfstoffe und Medikamente bereitzustellen. »Was die Übertragbarkeit angeht, liegt Influenza eindeutig auf dem Spitzenplatz«, erklärt Michael Osterholm, Direktor am Zentrum für Infektionskrankheiten der University of Minnesota und Mitglied des Beratergremiums NSABB. Ein hochansteckendes H5N1-Virus mit einer Mortalitätsrate um 60 Prozent, wie sie bei Opfern der Vogelgrippe beobachtet wurde, sei eine Furcht einflößende Vorstellung. Wie Osterholm betont, könnte H5N1 selbst bei 20-fach geringerer Mortalitätsrate mehr Opfer fordern als das Pandemievirus von 1918. Das NSABB sprach sich lange Zeit dafür aus, die Forschungsergebnisse von Kawaoka und Fouchier unter Verschluss zu halten, gab diese Haltung aber im vergangenen März auf.

Die meisten Experten für biologische Sicherheit stimmen darin überein, dass modifizierte Vogelgrippeviren – und speziell die H5N1-Typen, die sich unter Säugetieren verbreiten – potenzielle Biowaffen sind, die unter strikter Kontrolle gehalten werden müssen. »Ihre pure Existenz stellt ein Risiko dar«, sagt Richard H. Ebright, Experte für die Abwehr biologischer Waffen und Biochemiker an der Rutgers University in New Jersey, USA. »Sie birgt die Gefahr einer unbeabsichtigten Freisetzung und des Missbrauchs als Kampfmittel.«

Verärgert sind die Spezialisten vor allem darüber, dass die Experimente ohne vorherige Analyse von Nutzen und Risiken erfolgten. Im Jahr 2007 schrieben John Steinbruner und seine Kollegen vom Zentrum für internationale und sicherheitsrelevante Studien in Maryland (USA) einen Bericht, in dem sie empfahlen, »den Handlungsspielraum im Bereich der Grundlagenforschung einzuschränken, wo die individuelle Unabhängigkeit aus guten Gründen besonders geschätzt wird«. Dies fand zunächst kaum Beachtung. Nachdem aber die Arbeiten von Fouchier und Kawaoka ins Blickfeld geraten waren, verlangte die US-Regierung nach fundierten Einschätzungen, wie riskant Forschungen an H5N1 und am Pandemievirus in Kontakt kommen, zeigen keinerlei Symptome; oft lassen sich bei ihnen nicht einmal Antikörper gegen den Erreger nachweisen. Erkrankungen scheinen unter nahen Verwandten gehäuft aufzutreten, was dafür spricht, dass die Krankheitsanfälligkeit zum Teil genetisch bedingt ist. Kürzlich publizierte Forschungsergebnisse deuten auf eine Beteiligung des Gens *IFITM3* hin. Es kodiert für ein Protein der Immunabwehr, das die Vermehrung von Influenzaviren im menschlichen Körper bremst.

MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de

Eine ausführlichere Version dieses Textes finden Sie unter

http://tinyurl.com/8g6daxg

4 Wird das Virus die Fähigkeit erlangen, sich unter Menschen zu verbreiten?

Bislang scheinen sich Menschen nur bei engem Kontakt mit infizierten Vögeln anzustecken. Um Infektionswellen in der Bevölkerung auszulösen, müsste sich das Virus so verändern, dass es per Tröpfcheninfektion übertragbar ist. Die Arbeiten von Kawaoka und Fouchier haben gezeigt, dass das im Prinzip eintreten kann. Eine der größten Fragen zu H5N1 lautet, warum es nicht schon längst passiert ist. Denn viele Virusvarianten, die in Wildtieren überdauern, sind nur wenige Mutationen von dieser kritischen Veränderung entfernt. Zudem reproduziert sich das Virus oft fehlerhaft, so dass es sich evolutionär schnell wandelt.

Das Auftauchen einer leicht übertragbaren Virusvariante muss jedoch nicht zwangsläufig in eine Katastrophe münden. Denn möglichweise würde ein solcher Erreger eine geringe Pathogenität aufweisen. Durch die Luft übertragbare H5N1-Viren könnten bevorzugt Zellen in den oberen Atemwegen befallen und nicht mehr den verheerenden Schaden tief in der Lunge anrichten, den Wildstämme verursachen.

5 Lauern noch andere Gefahren?

H5N1 könnte sich mit dem Subtyp H1N1 vermischen, der 2009 die Schweinegrippe-Pandemie verursachte. Beide Virenvarianten haben in Experimenten spontan Gene ausgetauscht, wenn sie dieselbe Zelle infizierten. Wahrscheinlich tun sie das auch in der Natur, denn beide besitzen die Fähigkeit, Schweine anzustecken. Versuche haben gezeigt, dass die entstehenden Hybridviren mitunter besser an menschliche Zellen angepasst sind und eine höhere Virulenz aufweisen als ihre Vorläufer.

Andere Virussubtypen haben ebenfalls das Potenzial, eine Pandemie zu verursachen. Ein Kandidat ist H9N2. Es überdauert im Allgemeinen unbemerkt in asiatischem Geflügel, kann aber auch Menschen infizieren und Erbmaterial mit saisonalen Grippeviren austauschen. Einige H9N2-Stämme haben bereits Eigenschaften erworben, mit deren Hilfe sie sich leichter unter Säugetieren verbreiten. Ein anderer Anwärter ist das weit verbreitete H7N7, das vor etwa zehn Jahren 89 Menschen in den Niederlanden infizierte und einen davon tötete.

Ed Yong / © Nature

mievirus von 1918 seien. Steinbruner und andere sprechen sich nun für ein internationales Aufsichtsgremium mit der Befugnis aus, potenziell gefährliche Studien zu überwachen und gegebenenfalls zu reglementieren, wie es die WHO bereits bei Arbeiten mit Pockenerregern tut.

»Hundertprozentige Sicherheit wäre damit nicht zu erreichen, aber wir könnten die Norm durchsetzen, dass solche Experimente nicht mehr im stillen Kämmerlein stattfinden«, erläutert Steinbruner. Ein manipuliertes H5N1-Virus, das sich unter Säugern verbreiten kann, sei eine Waffe, die das Vernichtungspotenzial von Atombomben erreiche oder übertreffe. »Da reicht es nicht, wenn einzelne Wissenschaftler vorsichtig arbeiten – es bedarf institutionalisierter Sicherheitsmechanismen.«

Grenzen der Freiheit

Wie restriktiv sollen diese Vorgaben sein? Untersuchungen an H5N1 geheim zu halten, würde Wissenschaftler und Gesundheitsbehörden über eine globale Bedrohung im Unklaren lassen. Viele Sicherheitsexperten empfehlen deshalb, Forschungsarbeiten über Influenzaviren, die zwischen Säugern übertragbar sind, auf Labors der höchsten Sicherheitsstufe zu beschränken. Diese Einrichtungen müssten noch deutlich sicherer sein als jene, in denen Kawaoka und Fouchier ihre Experimente durchführten, lautet die Forderung. Das hätte zur Folge, dass nur noch wenige Wissenschaftler entsprechende Arbeiten durchführen könnten.

Auf der anderen Seite gibt es zahlreiche Forscher, die die Arbeiten von Kawaoka und Fouchier leidenschaftlich verteidigen. Je mehr wir über H5N1 wüssten, so argumentieren sie, desto besser könnten wir uns vor der Bedrohung durch natürlich auftretende, gefährliche Virusvarianten schützen. Gelänge es herauszufinden, welche Mutationen dem H5N1-Virus eine hohe Mortalitätsrate und Übertragbarkeit verleihen, dann könnten Experten die in Wildtieren vorkommenden Stämme auf bedrohliche Veränderungen hin beobachten. Dieser Einwand ist nicht von der Hand zu weisen, denn wenn ein neues humanpathogenes Influenzavirus erst einmal aufgetaucht ist und sich zu verbreiten beginnt, ist es zu spät, um die erste Infektionswelle zu verhindern. Meist dauert es ein halbes Jahr oder noch länger, bis ein neuer Grippeimpfstoff in ausreichender Menge vorliegt. Als die US-Gesundheitsbehörden beispielsweise auf den Schweinegrippeausbruch im Jahre 2009 aufmerksam wurden, hatte sich das Virus bereits in weiten Teilen Mexikos und der Vereinigten Staaten verbreitet und war dabei, eine Pandemie auszulösen.

Eine der von Kawaoka entdeckten Erbgutveränderungen, die eine Übertragbarkeit des H5N1 von Mensch zu Mensch ermöglichen, ist bereits bei natürlich vorkommenden Erregern beobachtet worden. Dies lässt befürchten, dass ein für Menschen tödlicher H5N1-Stamm unvermittelt auftauchen könnte. Karaoka schrieb dazu im Fachblatt »Nature«: »Da (entsprechende Mutationen) auch in der Natur vorkommen, ist es meines Erachtens unverantwortlich, die zu Grunde liegenden Mechanismen nicht zu erforschen.« Fouchier verteidigte seine Arbeit mit denselben Argumenten.

Es nützt allerdings nicht viel, die genetischen Merkmale eines potenziell tödlichen Influenzavirus im Detail zu kennen, ohne entsprechende großflächige Überwachungen durchführen zu können. Während früherer Ausbrüche der Vogelgrippe beispielsweise haben Virologen zwar systematisch die Tiermärkte in Südchina überprüft, die Kontrollen aber nicht auf den Rest des Landes und andere Teile Südostasiens ausgedehnt. Und in den Vereinigten Staaten hindern Viehzüchter häufig Gesundheitsbeamte daran, ihre Schweine zu untersuchen – obwohl es mittlerweile als wahrscheinlich gilt, dass Vorläufer des Schweinegrippevirus schon seit Jahren auf amerikanischen Farmen zirkuliert hatten, bevor sie sich 2009 in Mexiko verbreiteten. Hier gibt es noch viele Verbesserungsmöglichkeiten.

Doch auch ein noch so gutes Überwachungsprogramm bietet keinen hundertprozentigen Schutz vor Epidemien. »Wir sind heute zwar besser auf Krankheitsausbrüche vorbereitet als noch vor der Schweinegrippe-Pandemie 2009«, sagt Nancy Cox, Direktorin der Influenza-Abteilung an den Centers for Disease Control and Prevention, einer US-Gesundheitsbehörde. »Doch das Auftreten eines hochinfektiösen und hochpathogenen Influenzavirus beim Menschen würde die Welt noch immer überrumpeln. Ich glaube auch nicht, dass wir in ausreichender Weise vorsorgen können, solange wir nicht über einen Impfstoff verfügen, der universell gegen alle Influenzastämme wirkt.« Ein solcher Impfstoff ist jedoch nicht in Sicht. Und so befinden wir uns in der misslichen Situation, dass wir einerseits zu viel wissen – und andererseits zu wenig. ~

DER AUTOR

Fred Guterl ist Redaktionsleiter bei »Scientific American«.

QUELLEN

Lupiani, B., Reddy, S.M.: The History of Avian Influenza. In: Comparative Immunology, Microbiology and Infectious Disease 32, S. 311–323, 2009

Reid, A.H. et al.: Evidence of Absence: The Genetic Origins of the 1918 Pandemic Influenza Virus. In: Nature Reviews Microbiology 2, S. 909–914, 2004

Steinbruner, J. et al.: Controlling Dangerous Pathogens. Bericht des Zentrums für internationale und sicherheitsrelevante Studien in Maryland (CISSM), School of Public Policy, University of Maryland, März 2007

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1165733**

Jonathan Nott
Chefdirigent der Bamberger Symphoniker – Bayerische Staatsphilharmonie

Um mehr über Jonathan Nott zu erfahren, scannen Sie den QR-Code mit der entsprechenden App Ihres Smartphones oder gehen Sie direkt auf www.focus-entscheider.de/nott

PROVINZ FINDET NUR IM KOPF STATT.

Das Entscheidende im FOCUS

TEILCHENPHYSIK

Der lange Weg zum Higgs

Nach Jahrzehnten der Suche scheint das flüchtige Teilchen endlich gefunden zu sein, dessen besondere Eigenschaften eine neue Ära der Physik andeuten. Beteiligte Forscher lassen die entscheidenden Wochen und Monate bis zur offiziellen Verkündung der Entdeckung am 4. Juli 2012 Revue passieren – und riskieren einen Blick in die Zukunft.

Von Guido Tonelli, Sau Lan Wu und Michael Riordan

Am späten Abend des 14. Juni dieses Jahres machten sich einige Gruppen von Studenten und Postdocs am Large Hadron Collider (LHC) daran, ein bislang verschlossen gehaltenes Datenpaket zu untersuchen. Die gigantische Maschine am CERN, Europas Labor für Teilchenphysik bei Genf, hatte in den Monaten davor gewaltige Datenmengen produziert.

Die mehr als 6000 Physiker, die an den Großexperimenten des LHC arbeiten, gingen jedoch extrem vorsichtig vor, um ihre Auswertung nicht versehentlich zu verfälschen. So hatten sie beschlossen, zunächst bis Mitte Juni überhaupt nicht auf die Ergebnisse zu achten, also eine Art Blindstudie durchzuführen. Erst dann sollten alle Informationen zusammengebracht und untersucht werden. In jener Nacht schufteten die Jungforscher hektisch, um neue Indizien herauszufiltern. Zwar ist der LHC eine riesige Kollisionsmaschine mit zahlreichen Experimenten, doch nur die beiden größten davon – ATLAS und CMS – hatten die Aufgabe, das so genannte Higgs-Boson aufzuspüren. Dies ist das lange gesuchte Teilchen, welches das Standardmodell der Teilchenphysik komplettieren soll: die theoretische Beschreibung der subatomaren Welt.

Jeder der Detektoren registriert laufend in seinem Inneren die subatomaren Produkte aus unzähligen Protonenkollisionen, darunter vielleicht auch das flüchtige Higgs-Boson. Jedoch müssen die Messgeräte Unmengen von Teilchenspuren durchforsten, während der unaufhörliche Strom von Hintergrundteilchen mit niedriger Energie permanent droht, möglicherweise interessante Signale zu überdecken. Es ist, als wollte man aus einem Feuerwehrschlauch trinken und dabei versuchen, mit den Zähnen einige winzige Goldkörnchen herauszufischen.

Glücklicherweise wussten die Forscher ziemlich genau, wonach sie suchten. Nach dem katastrophalen Start des LHCs 2008 – nur neun Tage nach Beginn der Experimente schmolz eine Verbindungsnaht zwischen zwei Magneten, bildete sich ein gewaltiger Funkenüberschlag, der wiederum ein nahes Gefäß durchbohrte, setzte Tonnen von Helium frei und riss teure supraleitende Magnete aus ihrer Verankerung – konnten die Forscher seit 2011 große Datenmengen sammeln; ge-

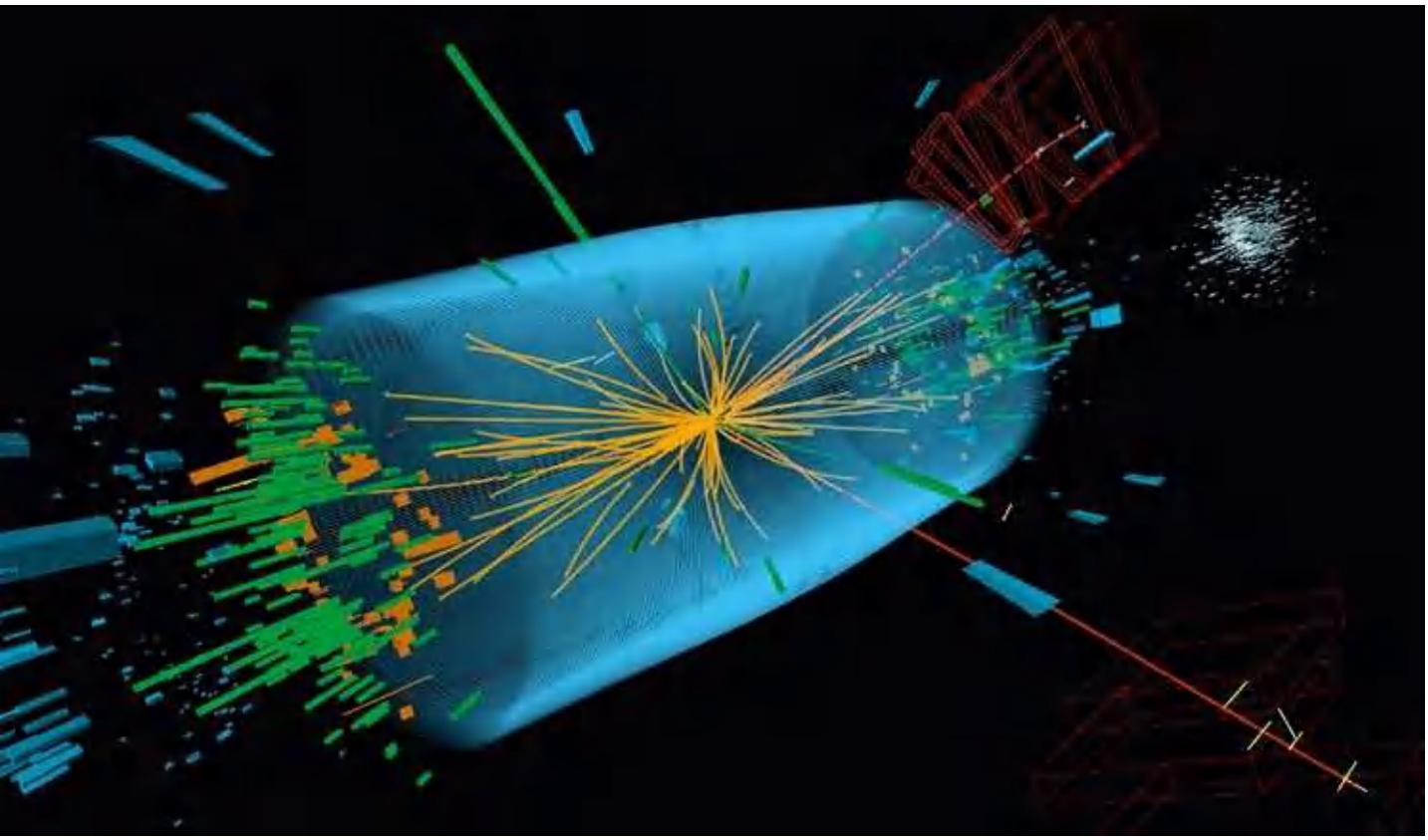
AUF EINEN BLICK

SCHLUSSSTEIN ODER GRUNDSTEIN?

1 Jahrzehntelang suchten Physiker nach dem **Higgs-Boson**, dem letzten fehlenden Bestandteil im Standardmodell der Teilchenphysik. Zwei gigantische Experimente am Large Hadron Collider des CERN stießen bereits 2011 auf erste Hinweise darauf.

2 Die Forscher verbargen die **Ergebnisse der Versuchsdurchläufe** vom Frühjahr 2012 in einer »Blindstudie« zunächst sogar vor sich selbst, um jede Verfälschung der Daten zu vermeiden. Erst Mitte Juni untersuchten sie die Resultate direkt.

3 Sie deuten klar auf ein »higgsartiges« Teilchen mit etlichen der Eigenschaften, wie sie die Theoretiker erwarteten. Zudem erlebten die Forscher bereits einige Überraschungen, die Anzeichen für **eine künftige Physik** liefern.



CERN/ THOMAS MCCAULEY UND LUCAS TAYLOR

Kollision zweier Protonen im CMS-Detektor des CERN: Das Ereignis zeigt typische Spuren vom Zerfall eines Higgs-Bosons, wie sie das Standardmodell vorhersagt – hier in ein Elektronenpaar (grüne Linien) sowie ein Myonenpaar (rote Linien).

nügend, um darin bereits auf erste Anzeichen von Higgs-Teilchen zu suchen.

Nachdem die Herbstrunde der Kollisionsläufe abgeschlossen war und der LHC für seine winterliche Wartungspause präpariert wurde, hielten ATLAS-Sprecherin Fabiola Gianotti und einer von uns (Tonelli), seinerzeit Sprecher des CMS, im überfüllten CERN-Auditorium ein Sonderseminar. Beide Detektoren hatten inzwischen unabhängig voneinander interessante Hinweise auf das Higgs-Teilchen in ihren Daten entdeckt. Zudem bestätigten sich die Datensätze gegenseitig. Sowohl ATLAS als auch CMS berichteten von mehreren Dutzend Ereignissen über dem erwarteten Hintergrund von Kollisionen, bei denen zwei Photonen mit einer Gesamtenergie von 125 Milliarden Elektronvolt oder 125 GeV herausschossen (1 GeV ist in der Teilchenphysik die Standardeinheit von Masse und Energie; sie entspricht einer Protonenmasse).

Häufung ungeklärter Signale

Solche Photonenpaare könnten der Theorie nach Zerfallsprodukte der kurzlebigen Higgs-Bosonen sein. Jedes der beiden Experimente entdeckte außerdem einige zusätzliche Ereignisse, bei denen vier geladene Leptonen (Elektronen oder Myonen) ähnlicher Energie entstanden waren. Auch diese könnten von Higgs-Bosonen stammen (siehe Kasten S. 56/57). Eine solche Häufung unabhängiger Signale, die zur gleichen Erklärung passten, hatte es bis dahin noch nicht gegeben. Sie legte nahe, dass es sich dabei nicht nur um Zufall oder Messfehler handelte. Doch nach den strengen Regeln der Teilchenphysiker genügte noch keines dieser Signale aus dem Jahr 2011, um schon als »Entdeckung« zu gelten.

Nur allzu oft hatten sich Spitzen oder kleine Hügel in den Messkurven als Scheineffekte oder statistische Fluktuationen herausgestellt. Die folgenden Kollisionsexperimente vom Frühjahr 2012, die in elf Wochen mehr Daten produzierten als die im gesamten Jahr 2011, hätten diese zarten Datenspitzen jederzeit auch wieder beseitigen und ins Hintergrundrauschen schieben können.

Konnten sich die kleinen Datenberge tatsächlich auf ein Higgs-Boson zurückführen lassen und nicht nur ein statistisches Artefakt bleiben, dann stieg die Chance, mit den neuen Messsignalen eine offizielle Entdeckung verkünden zu können – zugleich das Ende einer jahrzehntelangen Suchaktion und der Beginn einer neuen Ära im Verständnis von Materie und Kosmos.

Denn das Higgs-Boson ist nicht nur irgendein weiteres Partikel im Teilchenzoo, sondern vielmehr Eckstein eines geistigen Gebäudes, bekannt als das Standardmodell, das mehrere Theorien miteinander vereint, die die moderne Teilchenphysik beschreiben. Die Existenz dieses Teilchens hatte Peter W. Higgs von der University of Edinburgh bereits 1964

postuliert, unabhängig von ihm auch François Englert und Robert Brout in Brüssel sowie drei weitere Theoretiker in London. Das neue Partikel sollte alle Elementarteilchen durch einen raffinierten Mechanismus sozusagen mit Masse versorgen.

Das Gebilde ist der physikalische Ausdruck eines Felds, des Higgsfelds, das den gesamten Kosmos erfüllt und jedem Partikel seine individuelle Masse verleiht. Mit der Entdeckung der Quarks und Gluonen in den 1970er Jahren sowie der W- und Z-Bosonen der schwachen Wechselwirkung in den 1980er Jahren, waren fast alle Elemente des Standardmodells bereits bekannt.

Doch obwohl die Theoretiker behaupteten, dass das Higgs-Boson – oder etwas Ähnliches – existieren müsse, konnten sie seine Masse nicht vorhersagen. Daher und aus anderen Gründen wussten sie nicht wirklich, in welcher Ecke

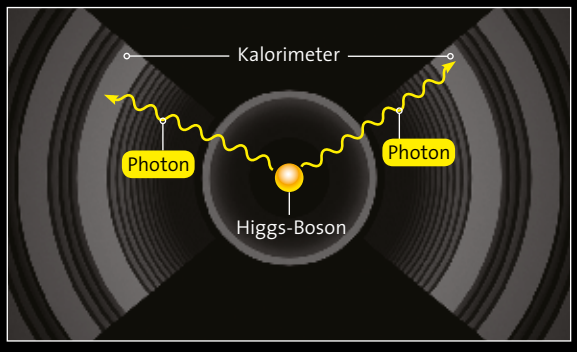
Der subtile Fingerabdruck des Higgs

Das Higgs-Boson ist ein äußerst instabiles Teilchen, das in unterschiedlichen Prozessen, auch Kanäle genannt, rasch zerfällt. Leider lassen sich viele dieser Zerfallskanäle nicht leicht von Hintergrundereignissen unterscheiden, die von den rund 500 Millionen Proton-Proton-Kollisionen pro Sekunde stammen. Die Detektoren ATLAS und CMS sind konstruiert, um seltene Vorgänge aufzuspü-

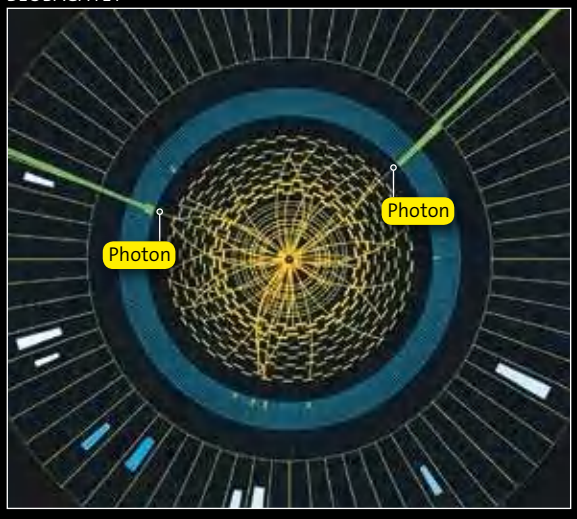
Photonen

Jeder Detektor enthält zahlreiche Kalorimeter: Geräte, die die Teilchenenergie messen. Das innerste Kalorimeter reagiert bevorzugt auf Photonen und absorbiert sie, wobei sie ein winziges elektrisches Signal erzeugen. Wenn ein Higgs in zwei Photonen zerfällt, dann kann der Detektor deren Energie äußerst präzise messen, was den Rückschluss auf die Masse des neu gefundenen Teilchens ermöglicht.

ERWARTET



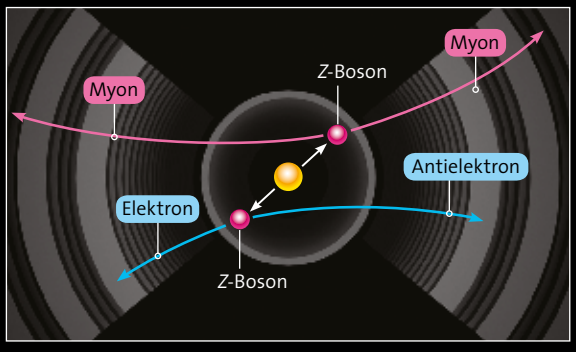
BEOBACHTET



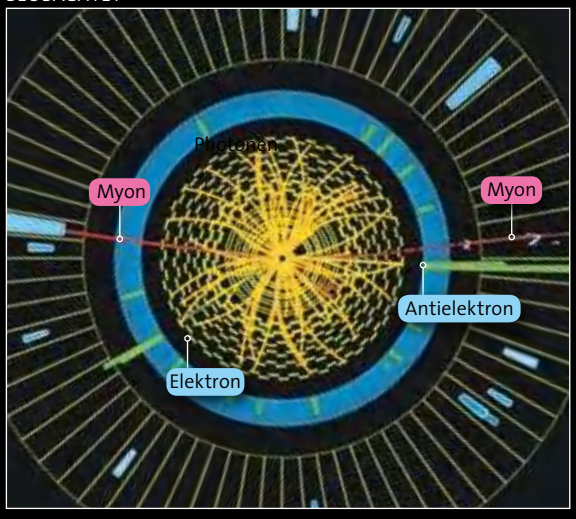
Z-Bosonen

Das Higgs kann auch in Paare von Z-Bosonen zerfallen, aus denen wiederum jeweils ein Elektron und ein Antielektron oder zwei Myonen entstehen. Ein innerer Spurenverfolger und das Kalorimeter registrieren Elektronen, während die Myonen ungebremst wegfliegen und lediglich Spuren hinterlassen. Starke Magnetfelder krümmen die Bahn von Elektronen und Myonen, was reicht, um ihre Energie und damit die Higgs-Masse zu bestimmen.

ERWARTET



BEOBACHTET



des Teilchenzoos sie das unbekannte Gebilde suchen sollten. Ein früher Kandidat mit dem Neunfachen der Protonenmasse tauchte 1984 am Teilchenbeschleuniger DESY in Hamburg auf, verschwand aber bald wieder von der Bildfläche.

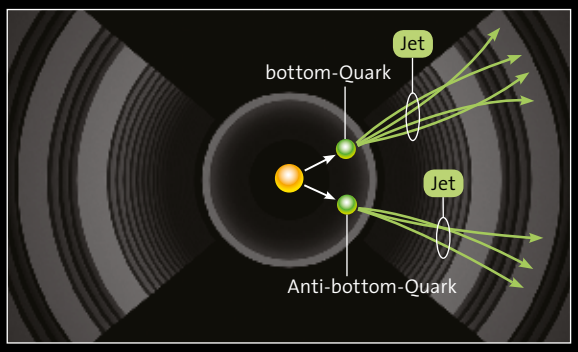
Die meisten Forscher waren sich schon damals einig, dass seine Masse mindestens 10- bis 100-fach größer sein musste. Falls dem so war, ließ sich das Higgs nur mit einer viel größeren Maschine entdecken als etwa dem Tevatron des Fermi National Laboratory bei Chicago. Der sechs Kilometer lange Protonen-Antiprotonen-Beschleuniger ging 1983 in Betrieb. Im gleichen Jahr begann CERN mit dem Bau des Milliarden Euro teuren Large-Electron-Positron(LEP)-Beschleuniger und bohrte dafür in 50 bis 175 Meter Tiefe einen 27 Kilometer langen Ringtunnel, der die französisch-schweizerische Grenze bei Genf viermal kreuzte. Neben anderen Forschungszielen stand das Higgs-Boson auf der LEP-Wunschliste schon da-

ren, die von einem Higgs-Zerfall stammen könnten, und alle anderen zu ignorieren. Die Grafiken zeigen vier der wichtigsten Zerfallskanäle, nach denen die Experimente Ausschau halten, zusammen mit Bildern von higgsartigen Signalen, wie sie CMS 2011 und 2012 beobachtet hat. Da die Entdeckung nur statistisch möglich ist, kann kein Einzelereignis als definitiver Nachweis gelten.

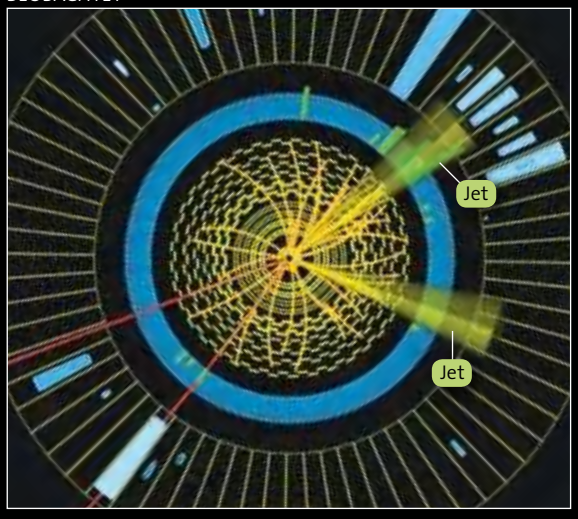
bottom-Quarks

Ein weiteres mögliches Schicksal des Higgs ist der Zerfall in ein bottom-Quark und sein Antiteilchen. Jedes dieser Gebilde zerlegt sich in eng gebündelte »Jets« (Strahlen) von Hadronen, also Partikeln, die wie das Proton aus Quarks aufgebaut sind. Diese dringen durch die Innenschichten des Detektors und geben ihre Energie in den äußeren Kalorimetern ab. Leider erzeugen auch normale Kollisionen Hadronenjets aus bottom-Quarks, was die Entdeckung der Higgs-Ereignisse erschwert.

ERWARTET



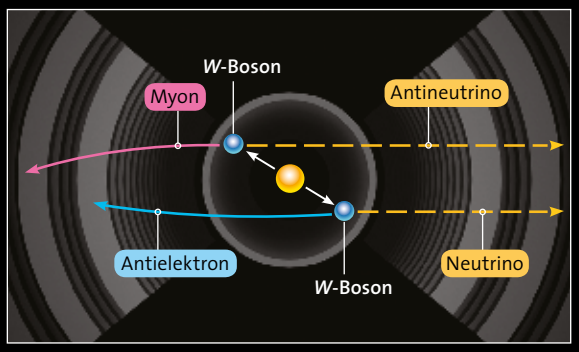
BEOBACHTET



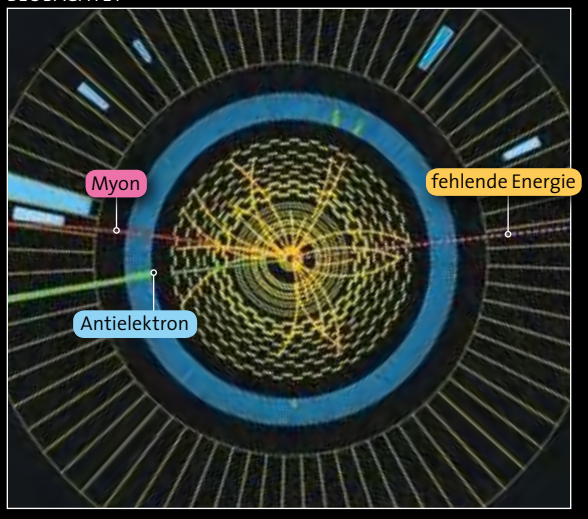
W-Bosonen

Schließlich kann das Higgs auch in zwei W-Bosonen zerfallen, aus denen jeweils ein Elektron, Antielektron oder Myon sowie ein Neutrino oder Antineutrino entsteht. Neutrinos sind schwer nachzuweisen – sie entschwinden spurlos, wobei sie aus der Kollision etwas Energie mitnehmen. Das erlaubt Forschern, auf ihre Präsenz bei einer Kollision zu schließen, behindert aber auch eine exakte Rekonstruktion der Higgs-Masse.

ERWARTET



BEOBACHTET



GEORGE RETSECK, NACH: CERN

50 Jahre Higgs-Teilchen

Die Entdeckung eines higgsartigen Teilchens in diesem Sommer markierte den Höhepunkt einer Jahrzehnte währenden Suchaktion. Schon Jahre bevor das Standardmodell theoretisch vollständig war, hatten Forscher bemerkt, dass sie nicht erklären konnten, warum Teilchen überhaupt eine Masse haben. Sie postulierten daher ein neues Feld – heute Higgs-Feld genannt –, das die zunächst masselosen Partikel verlangsamt und ihnen so ihre träge Masse verleiht. Diesem Feld ließ sich auch ein besonderes Teilchen zuordnen – und so begann die Jagd auf das Higgs.

AUGUST 1964

Die Artikel

François Englert und Robert Brout publizieren den ersten Beitrag, und schlagen ein Teilchen vor, das später nach Peter W. Higgs (links) benannt wird, dem Autor des zweiten Beitrags, der etwas später erscheint. G. Kuralnik, C. Hagen und T. Kibble veröffentlichten die dritte Arbeit im November.

JANUAR 1983

Entdeckung des *W*-Bosons

Einer der letzten fehlenden Bausteine im Standardmodell wird im SPS nachgewiesen, dem Super-Proton-Synchrotron-Beschleuniger im CERN.

AUGUST 1979

Gluonen entdeckt

Am Beschleuniger DESY in Hamburg gelingt den Physikern der Nachweis des Gluons, des Trägerteilchens der starken Kernkraft. Theoretiker berechnen, dass aus der Vereinigung von Gluonen mehr Higgs-Bosonen entstehen sollten als bei jedem anderen Prozess.

JULI 1999

Neuer Beschleuniger in Betrieb

Im 27 Kilometer langen Ringtunnel des CERN wird eine neue Teilchenmaschine, der Large-Electron-Positron-Beschleuniger, fertig gestellt.

mals weit oben. Auch die US-Physiker machten sich seinerzeit in der Reagan-Ära daran, in Texas eine große Maschine zu entwerfen und zu bauen, den Superconducting Super Collider (SSC).

Mit seinen geplanten 40 TeV (40 000 GeV) sollte der SSC das Higgs aufspüren, selbst wenn es eine Masse von bis zu 1000 GeV haben sollte. Doch nachdem sich die Kosten bald auf mehr als zehn Milliarden Dollar verdoppelten, stoppte der amerikanische Kongress das Vorhaben.

Auffällige Resultate kurz vor Abschalten des Tevatrons erbrachten keine Entdeckung

Um weiterforschen zu können, zogen sich die enttäuschten amerikanischen Higgs-Jäger ans Fermilab und ans CERN zurück. Weitere Entdeckungen und Präzisionsmessungen am LEP und Tevatron konnten inzwischen immerhin ausschließen, dass die Higgs-Masse mehr als 200 GeV beträgt. Damit lag das Teilchen aber durchaus noch in der Reichweite dieser Maschinen. Doch ein ganzes Jahrzehnt weiterer Experimente erbrachte keinerlei direkte Hinweise auf »das Higgs«.

Während der letzten Monate der LEP-Laufzeit im Sommer 2000 beschlossen die Physiker, die Energie der Teilchenkollisionen weit über die Konstruktionsgrenzen der Maschine hinauszutreiben. In diesen Wochen tauchten bei den Experimenten plötzlich erste Hinweise auf das Higgs auf. Im September meldeten zwei der vier LEP-Detektoren von Ereignissen, bei denen ein Z-Boson plus ein weiteres mysteriöses Teilchen gemessen wurden, das weiter in zwei bottom-Quarks zerfiel – ein Teilchen, das verdächtig nach einem Higgs-Boson mit einer Masse von 115 GeV aussah. Der damalige CERN-Direktor Luciano Maiani genehmigte der Maschine eine Verlängerung von sechs Wochen.

Aber in der Zeitspanne registrierten die Experimentatoren lediglich ein einziges weiteres potenzielles Ereignis dieses Typs. Das reichte natürlich nicht. Nach hitziger Debatte beschloss Maiani, den LEP abzuschalten und mit der geplanten Konversion zum LHC zu beginnen – also jener Maschine, die zu dem Zeitpunkt bereits für die Entdeckung des Higgs-Bosons entworfen war.

Der LHC enthält die fortschrittlichsten Technologien, die jemals in einer Anlage vereint wurden. Unter Leitung des Projektmanagers Lyndon Evans bauten Beschleunigerphysiker und Ingenieure die Anlage in den vorhandenen LEP-Tunnel ein. Die wichtigsten LHC-Komponenten bestehen aus 1200 supraleitenden Dipolmagneten – glänzende, jeweils 15 Meter lange Zylinder, von denen jeder rund eine Million Dollar kostete. Hergestellt von deutschen, französischen und italienischen Firmen, enthalten sie zwei Röhren, umgeben von magnetischen Niob-Titan-Spulen, die bei 1,9 Kelvin oder –271 Grad Celsius in flüssiges Helium getaucht sind. In den beiden Röhren kreisen die Protonenstrahlen gegenläufig fast mit Lichtgeschwindigkeit und mit Energien bis zu 7 TeV.

Diese Strahlen ähneln eher Sequenzen von Laserlichtpulsen als einem einzelnen Blitzlicht. Jeder besteht aus fast 1400 »Paketen« mit jeweils bis zu 150 Milliarden Protonen – zum Vergleich: Das ist etwa die Zahl der Sterne in der Milchstraße. Wenn sich zwei dieser Teilchenpakete an ausgewählten Messpunkten begegnen, stoßen im Normalbetrieb 10 bis 30 Pro-

2. NOVEMBER 2000
Ende einer Ära
Der LEP-Beschleuniger wird abgeschaltet. Zeitgleich beginnt der Bau des Large Hadron Collider (LHC), mit dem 2012 das Higgs entdeckt wird.

10. SEPTEMBER 2008
Der LHC startet
Am fertig gestellten LHC werden die ersten Protonenstrahlen in die Röhren geschossen.

SEPTEMBER 2000
Letzter Schuss auf das Higgs
Kurz bevor der LEP abgeschaltet werden soll, stoßen die Physiker auf Anzeichen des Higgs. Sechs Wochen später und ohne Ergebnis wird die Maschine trotzdem abgeschaltet. Heute ist bekannt: Die Spur war falsch, die vermutete Masse zu niedrig.

19. SEPTEMBER 2008
Folgenreicher Zwischenfall
Eine Verbindungsstelle zwischen zwei Magneten schmilzt und setzt einen Funken frei, der ein Magnetgefäß durchschlägt und Tonnen von Helium freisetzt. Über 50 Magnete werden aus ihrer Verankerung gerissen oder anders beschädigt.

4. JULI 2012
Higgsartiges Teilchen entdeckt
CERN-Forscher verkünden, dass sie ein higgsartiges Partikel mit einer Masse von 125 GeV gefunden haben.

PETER HIGGS: AP IMAGES / REX FEATURES; RESTLICHE FOTOS: CERN

tonen miteinander zusammen. In jeder Sekunde produzieren die Paketströme damit insgesamt eine halbe Milliarde Kollisionen.

Wenn Protonen miteinander kollidieren, dann ist das viel »schmutziger« als bei Leptonen wie Elektronen und Positronen. Der Theoretiker Richard Feynman verglich einmal den Vorgang mit zwei Mülleimern, die aufeinanderkrachen, wobei eben auch eine Menge Müll herausfliegt. Das liegt an den Protonen: Sie sind nicht strukturlos wie die Elektronen, sondern aus Quarks und Gluonen zusammengesetzt. Bei den interessantesten Ereignissen kollidieren zwei Gluonen bei Energien von rund 100 GeV miteinander und gelegentlich sogar bei einem TeV. Mit Hilfe von raffinierten Detektoren, Spezialelektronik und Supercomputern versuchen die Physiker dann, aus Milliarden langweiligen Vorfällen die wenigen interessanten herauszufiltern.

> »Wenn zwei Protonen miteinander kollidieren, dann gleicht das **zwei Mülleimern,** die aufeinanderkrachen – es fliegt Müll heraus.«

Die Detektoren ATLAS und CMS können beide das Higgs nicht direkt beobachten – dafür ist es einfach zu instabil. Vielmehr halten sie Ausschau nach indirekten Hinweisen darauf, dass es im Zentrum der Kollisionspunkte entstand und sogleich wieder in leichtere Teilchen zerfiel. Je nach Masse des Higgs-Bosons kann das auf vielfältige Weise geschehen (siehe Grafiken S. 56/57). 2011 konzentrierten sich die Forscher auf seltene Zerfälle in zwei Photonen und vier geladene Leptonen. Der Grund: Diese Reaktionen lassen sich besonders einfach vom schmutzigen Hintergrund unterscheiden, der sonst das gesuchte Signal verdecken könnte.

Die unfallbedingte Verzögerung am LHC gab den Physikern am Fermilab die letzte Gelegenheit, das Higgs als Erste zu entdecken. Kurz vor dem geplanten Abschalten des Tevatron im September 2011 produzierten die Experimente CDF und D-Zero wenige Ereignisse, bei denen Paare von bottom-Quarks mit Energien von 125 und 155 GeV auftraten. Aber ähnlich wie beim Abschalten des LEP konnten die Forscher ihren Direktor nicht davon überzeugen, die Laufzeit zu verlängern, und so wurde der Tevatron kurz danach eingemottet (siehe »Abschied vom Tevatron« von Tim Folger, SdW 1/2012, S. 46). Diesen März reichten die Fermilab-Forscher übrigens eine genauere Analyse nach, in der sie einen Datenpeak bei 125 GeV gefunden hatten, was mit den Resultaten am CERN übereinstimmt.

Bis zum Mai 2012 produzierte der LHC 15-mal mehr Messdaten als der Tevatron insgesamt – eine Leistung der Physiker unter der Leitung von Stephen Myers. Bei diesen Versuchsläufen gelangte die Arbeit von Tausenden von Physikern am ATLAS und CMS an ihr Ziel, die die Detektoren entwarfen und betrieben, die Computerprogramme schrieben, um neuartige Ereignisse zu erkennen und aus dem Da-

tenwust herauszufiltern. Jeder arbeitete jetzt fieberhaft in Erwartung einer großen Entdeckung. Als dann die Forscher Mitte Juni die Datenpakete öffneten, mussten sie zuerst Unmengen von Messwerten durchforsten.

Nachdem die Studenten und Postdocs die Nacht durchgeschuftet hatten, waren alle auf die Ergebnisse gespannt. Es war ein heißer Nachmittag am 15. Juni, als die CMS-Physiker in Raum 222 des Filtergebäudes strömten, um sich die Berichte der jungen Forscher anzuhören. Bald war der Saal mit hunderten Mitgliedern der Arbeitsgruppen gefüllt, viele mussten am Boden sitzen oder stehen. Die Spannung im Raum ergriff alle Anwesenden.

»Ich glaube, wir haben es!«
Rolf-Dieter Heuer,
Direktor des CERN am 4. Juli 2012

Der erste Sprecher diskutierte eine mögliche Zerfallsmöglichkeit für das Higgs, einen so genannten »Kanal«, und zwar den in Paare von *W*-Bosonen. Ein kleiner Überschuss an Ereignissen war bei niedrigen Massen in den Daten aufgetaucht, aber das schwache Signal erregte kein weiteres Aufsehen. Es folgten zwei Präsentationen über den seltenen Vier-Leptonen- sowie den Zwei-Photonen-Zerfall. Jetzt endlich begann es so auszusehen, als würde sich in den Messwerten das Higgs-Boson zeigen.

Hektische Tage, schlaflose Nächte

Die Signale von 2012 häuften sich abermals in der gleichen Gegend der Massenskala – bei 125 GeV –, die die Forscher schon sechs Monate zuvor beschäftigt hatte. Sie bemerkten sogleich, dass sie die neuen Daten eigentlich nur mit den älteren von 2011 kombinieren mussten, um für CMS die Entdeckung des Higgs verkünden zu können. Nach den beiden Kurzvorträgen brandete erstmals Beifall auf.

Ähnliche Enthüllungen gab es beim Vortrag über das ATLAS-Experiment. Spontan wurde in mehreren Gruppen gefeiert, nachdem sie die Auswertungen der neuen Versuchsdurchgänge gesehen hatten. Dennoch sollte es noch eine ganze Woche hektischer Arbeit mit schlaflosen Nächten dauern, bis sich die Physiker so weit sicher waren, dass die Wahrscheinlichkeit für eine zufällige Häufung der Ereignisse kleiner war als eins zu drei Millionen. Das entspricht dem harten »Fünf-Sigma-Standard« der Teilchenphysiker, ab dem erst sie von einer »Entdeckung« sprechen (Sigma ist ein statistisches Maß für die Signifikanz von Daten).

Zu diesem Zeitpunkt war die Nachricht von der Entdeckung schon durchgesickert. Das weltweite Interesse wuchs jetzt so stark, dass zunächst strenge Geheimhaltung vereinbart wurde. Vor der offiziellen Präsentation der Ergebnisse sollten keine bruchstückhaften Informationen mehr an die Öffentlichkeit dringen, vor allem weil sich der genaue Inhalt der Aussagen während der Vorbereitung noch ändern konnte. Außerdem sollten ATLAS-Mitglieder nicht mit ihren CMS-Kollegen über ihre neuen Resultate sprechen und umgekehrt. Einzelne Physiker ließen sich dennoch nicht davon abhalten, die Neuigkeiten zu diskutieren, auf die alle so lange gewartet hatten. Gedämpfte Diskussionen waren auf den Fluren und in der CERN-Cafeteria zu hören. Die Erwartung stieg, und der Druck wuchs, die Sache öffentlich anzukündigen.

Dem Direktor des CERN, Rolf-Dieter Heuer, wurde die Präsentation am 22. Juni kurz in einem Treffen mit Gianotti und Joseph Incandela von der University of California, Santa Barbara, Tonellis Nachfolger als CMS-Sprecher, gezeigt. Heuer entschied, dass die Daten ausreichten, um sie zu veröffentlichen. Umgehend informierte er den CERN-Rat, der die Forschungseinrichtung überwacht, um sie über die schnelle Entwicklung auf dem Laufenden zu halten. Dann beschloss Heuer, am 4. Juli, dem Eröffnungstag der 36. Internationalen Konferenz für Hochenergiephysik in Melbourne, ein CERN-Seminar abzuhalten – und im Anschluss daran eine CERN-Pressekonferenz.

In der Nacht davor warteten bereits hunderte Physiker in den Fluren und Gängen vor dem abgeschlossenen großen Vortragssaal, um einen der wenigen nicht reservierten Sitzplätze zu ergattern. Stephen Myers, Lyndon Evans sowie vier frühere CERN-Direktoren, die am LHC von Anfang an direkt beteiligt waren, saßen in der ersten Reihe. Frisch vom Flugzeug aus Genf betrat Peter Higgs unter Willkommensapplaus den Saal und setzte sich neben den ebenfalls anwesenden François Englert.

Incandela und danach Gianotti bombardierten ihre Zuhörer mit Bildern von ihren neuen Daten und Analysen, die meisten von den Messungen von 2012. Wie schon im Dezember 2011 wiesen die Messkurven der Zwei-Photonen-Kanäle deutliche Peaks bei 125 und 126 GeV auf. Bis zu der Präsentation hatten die Detektoren noch mehrere Dutzend weiterer Ereignisse eingefangen, in denen ein schweres Teilchen bei 125 GeV in vier geladene Leptonen explodiert war. Auch in diesem Kanal ließen sich in den Kurven deutlich kleine Datenhügel ausmachen.

Das überzeugte die Forscher. Kombinierte man das Ergebnis mit den Zwei-Photonen-Zerfällen, folgerten die Teams

von CMS und ATLAS unabhängig voneinander, dass die Wahrscheinlichkeit für eine Zufallsfluktuation in den Messungen bei weniger als eins zu drei Millionen lag. Das Phänomen war demnach real. Als die Fernsehkamera auf Peter Higgs schwenkte, sah man, dass er ein Taschentuch zog, um sich die Augen zu trocknen. »Ich glaube, wir haben es!«, rief Rolf-Dieter Heuer in den Saal. »Wir haben ein neues Teilchen beobachtet, das konsistent mit einem Higgs-Boson ist.«

Nur wenige Physiker bezweifeln zwar, dass ein neues schweres Partikel entdeckt worden war. Aber um was genau handelte es sich eigentlich? Physiker am CERN diskutierten diese Frage nur zögerlich und sprachen lieber von einem »higgsartigen Boson«. Sie bestanden darauf, dass erst noch mehr Messungen nötig wären, um seine Eigenschaften bestimmen zu können. Beispielsweise hat CERN noch nicht zweifelsfrei geklärt, ob das neue Teilchen einen Spin von null hat, wie es das Standardmodell für das Higgs-Boson verlangt. Gleichwohl legt ein Vergleich mit Daten des Tevatron (publiziert am 2. Juli in einem offensichtlichen Versuch, auch ins Rampenlicht zu gelangen) dies ebenfalls nahe. Weiterhin wurden am ATLAS und am CMS mehr Zwei-Photonen-Zerfälle entdeckt, als nach der Theorie zu erwarten war. Fehlte da vielleicht etwas? Oder deutete das auf eine neue Physik?

Theoretiker wie Experimentatoren konzentrieren sich auf die Frage, ob es sich bei dem neuen Teilchen tatsächlich um »das« Higgs-Boson handelt, wie es das Standardmodell vorhergesagt hat. Dies kann durch weitere Präzisionsmessungen geklärt werden, die zeigen, wie es in andere Sekundärpartikel zerfällt. Die offizielle Publikation, die Ende Juli eingereicht wurde, betrachtet auch andere Zerfallskanäle, die dem Standardmodell nicht widersprechen. CMS bleibt bei einer Fünf-Sigma-Entdeckung, während die ATLAS-Ergebnisse an Signifikanz sogar noch zugenommen haben.

Beginn einer aufregenden Phase der Teilchenphysik

John Ellis und Tevong You analysierten die kombinierten Beobachtungen von LHC und Tevatron. Ergebnis der CERN-Theoretiker: Das neue Teilchen verhält sich in der Tat wie ein Higgs-Boson. Der überraschend starke Zusammenhang des Partikels mit hochenergetischen Photonenpaaren hat bereits heiße Debatten ausgelöst. Weil das Higgs anderen Elementarteilchen Masse verleiht, sollte es mit schwereren Teilchen stärker in Wechselwirkung treten. Photonen selbst haben aber keine Ruhemasse. Daher wechselwirkt das Higgs-Boson mit ihnen indirekt über andere, massehaltige Zwischenteilchen. Zusätzliche überschwere Partikel, wie sie vereinheitlichte Feldtheorien wie die Supersymmetrie fordern, würden den Zerfallsprozess noch verstärken – was laut den ersten Daten offenbar auch passiert. Bestätigt sich diese Entwicklung, würde das starke Hinweise auf eine Physik jenseits des Standardmodells liefern.

Die epochale Entdeckung des Higgs-Bosons markiert das Ende einer langen Ära der Teilchenphysik sowie den Beginn einer aufregenden neuen Phase, in der Prozesse auf der TeV-Skala untersucht werden können. Nach Jahrzehnten der Flaute hat diese Forschungsrichtung neues Leben erhalten, dank erfolgreicher Zusammenarbeit von Theorie und Experiment. Natürlich tauchen jetzt neue Fragen auf, die sich hoffentlich mit weiterer Forschung zum neuen Teilchen und zu seinen potenziellen Partnern beantworten lassen. Spielt es vielleicht eine Rolle bei der kosmischen Inflation, die als jene Kraft angesehen wird, die das Universum an seinem Beginn exponentiell vergrößert hat? Tritt es mit der Dunklen Materie in Wechselwirkung, die nach Meinung vieler Astronomen das Universum ausfüllt? Und schließlich: Welche Hochenergieprozesse schützen das fragile Vakuum vor Instabilitäten, die vielleicht sogar unsere Existenz gefährden könnten?

Während wir jetzt den Triumph des Standardmodells erleben, könnte uns das Higgs-Boson bereits auf die Fährte einer neuen Physik bringen. Das Teilchen eröffnet uns ein großartiges Labor für weitere Experimente. Hat es wirklich alle Eigenschaften, wie die Theorie sie vorhersagt? Die bislang vorliegenden Diskrepanzen in den Daten könnten statistische Fluktuationen sein, die mit weiteren Messreihen in den kommenden Monaten wieder verschwinden. Oder sie deuten auf spannende neue Physik hin. ~

DIE AUTOREN

Guido Tonelli (links) arbeitet seit 1993 am CMS-Experiment des CERN, 2010 und 2011 auch als sein Sprecher. Er ist Professor der Università degli Studi di Pisa. **Sau Lan Wu** ist Mitglied des ATLAS-Experiments am CERN, außerdem Enrico Fermi Distinguished Professor für Physik an der University of Wisconsin-Madison. **Michael Riordan** ist Wissenschaftshistoriker und Autor zahlreicher Sachbücher, darunter »The Hunting of the Quark« (1987).

QUELLEN

Aczel, A. D.: Der Welterklärer. Interview mit Steven Weinberg. In: Spektrum der Wissenschaft 12/2010, S. 34–37
Collins, G. P.: Entdeckungsmaschine der Superlative. In: Spektrum der Wissenschaft 9/2008, S. 32–39
Folger, T.: Abschied vom Tevatron. In: Spektrum der Wissenschaft 1/2012, S. 46–53
Kane, G.: Das Geheimnis der Masse. In: Spektrum der Wissenschaft 2/2006, S. 36–43
Körkel, T.: Der LHC nach Higgs. Interview mit Siegfried Bethke. In: Spektrum der Wissenschaft 10/2012, S. 60–66
Samulat, G.: Ring der Erkenntnis. In: Spektrum der Wissenschaft 9/2006, S. 80–87

WEBLINKS

http://atlas.ch
http://cms.cern.ch
Webseiten des ATLAS-Experiments und des CMS-Experiments am CERN

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1165735**

INTERVIEW

»Urananreicherung mit Lasertechnik – billig und politisch hochbrisant«

Ein neues Verfahren verspricht, die Herstellung von Kernbrennstoff deutlich zu vereinfachen. Doch **Wolfgang Sandner**, Präsident der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, gibt zu bedenken: Zugleich wird mit »Silex« auch die Verbreitung von Nuklearwaffen erleichtert.

Spektrum der Wissenschaft: Herr Professor Sandner, die Deutsche Physikalische Gesellschaft warnt vor einem neuartigen Verfahren zur Anreicherung von natürlichem Uran. Warum?

Prof. Wolfgang Sandner: Die Firmen Hitachi und General Electric wollen das so genannte Silex-Verfahren in einer Fabrik im US-Bundesstaat North Carolina verwirklichen. Silex heißt »Separation of Isotopes by Laser Excitation«, Isotopentrennung durch Laseranregung. Ende September erteilte die US-Atomaufsichtsbehörde NRC dem Verfahren die Zulassung. Jetzt kann man davon ausgehen, dass die Fabrik tatsächlich gebaut wird. Die DPG möchte vor einer unkontrollierten Verbreitung der Technologie warnen, da sie zur Herstellung von waffenfähigem Uran genutzt werden könnte.

Das Silex-Verfahren setzt Laser ein, um Uran anzureichern. Bisher werden dafür vor allem Zentrifugen verwendet. Was macht das neue Verfahren gefährlicher?

Sandner: Mit Lasern lässt sich Uran pro Durchlauf deutlich stärker anreichern als in Zentrifugen. Man schätzt, dass Silex mindestens zehnmal so effizient ist, denkbar ist aber auch ein Faktor 100 oder 1000. Eingeweihte Beobachter halten es für möglich, dass innerhalb von zwölf Tagen etwa ein Kilogramm relativ hoch angereichertes Uran gewonnen werden kann. Mit Gaszentrifugen fallen in dieser Zeitspanne nur Grammmengen an; darum müssen Zentrifugen zu Tausenden, wenn nicht sogar zu Zehntausenden hintereinandergeschaltet werden.

Sie glauben diesen kühnen Behauptungen?

Sandner: Wenn sich zwei so große Firmen der Sache annehmen, muss man das schon ernst nehmen. Und Experten bestätigen die Aussagen der Hersteller.

»Wir warnen vor einer unkontrollierten Verbreitung der Technologie, da sie zur Herstellung von **waffenfähigem Uran** dienen kann«

Eigentlich sind Sie Laserphysiker. Wie sind Sie mit dem Thema Urananreicherung in Berührung gekommen?

Sandner: In den 1980er Jahren habe ich mittels Lasern sehr hoch angeregte Atome hergestellt. Dabei werden verschiedene Isotope eines Elements durch unterschiedliche Wellenlängen angeregt. Das kann man verwenden, um diese zu trennen, so auch bei Uran. Natürliche Uranvorkommen bestehen bloß zu 0,7 Prozent aus Uran-235, der Rest ist Uran-238. Aber nur Uran-235 ist spaltbar; deswegen muss man seinen Anteil im Uran erhöhen, um es in Kernreaktoren zu nutzen.

»Spektrum der Wissenschaft« hat schon im April 1982 von dieser Möglichkeit berichtet. Damals hieß es, das Laserverfahren zur Urananreicherung stünde kurz vor dem Durchbruch. Wieso hören wir erst jetzt wieder davon?

Sandner: In Deutschland und vielen anderen Ländern wurde die Forschung in den 1980er Jahren eingestellt. Denn die damals bekannten Methoden erwiesen sich als unwirtschaftlich. Die Laser waren zu teuer und die Ausbeuten zu gering.

Die Physiker Horst Struve und Michael Goldsworthy haben in Australien weiter an dem Verfahren gearbeitet und 1988 das Unternehmen Silex Systems Limited gegründet. Haben Sie eine Erklärung dafür, wie ihnen nach all den Jahren der Durchbruch gelungen ist?

Sandner: Wesentliche Teile des Verfahrens sind geheim. Man weiß, dass Uran als gasförmige Verbindung – Uranhexafluorid – mit einem 16-Mikrometer-Laser beschossen wird. Das regt selektiv nur diejenigen Uranhexafluorid-Moleküle, die Uran-235 enthalten, zu Schwingungen an. Die anderen, in denen Uran-238 steckt, bleiben im Grundzustand.

FORSCHUNGSVERBUND BERLIN E.V.

Wolfgang Sandner ist Direktor am Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie sowie Professor an der Technischen Universität Berlin. Seit April 2010 steht der 63-Jährige außerdem der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG) als Präsident vor.

Braucht man dazu einen speziellen Laser?

Sandner: Prinzipiell reichen CO_2-Laser, wie sie etwa in Automobilfabriken zum Schneiden und Schweißen von Karosserieblechen eingesetzt werden. Allerdings muss man die Laserstrahlung so anpassen, dass sie die genaue Anregungsfrequenz des Uranhexafluorids trifft. Solche Verfahren sind zwar bekannt, aber sie auf den großtechnischen Maßstab zu übertragen, ist schwierig. Doch das eigentliche Problem ist der nächste Schritt. Nachdem man die Uran-235-Moleküle in Schwingung versetzt hat, muss man sie von den anderen trennen. Wie das in Silex gelingt, ist das große Geheimnis.

Haben Sie eine Vermutung?

Sandner: Es gibt verschiedene chemische und physikalische Möglichkeiten. Man könnte zum Beispiel die bereits angeregten Moleküle mit einem weiteren Laser ionisieren und die Isotope dann mit einem elektrischen oder magnetischen Feld trennen. Solche Ionisationsmethoden wurden jedoch schon früher untersucht und als ineffizient abgetan.

Und auf anderem Weg?

Sandner: Die Entwickler des Verfahrens könnten beispielsweise ausnutzen, dass sich ein vibrierendes Molekül leichter aufbrechen lässt – wiederum durch einen Laser oder durch Stöße mit anderen Molekülen. Anhand der unterschiedlichen Massen der Fragmente könnte man dann die verschiedenen Isotope voneinander trennen. Aber auch das Gegenteil ist denkbar: Angeregte Moleküle lagern sich möglicherweise eher aneinander und bilden einen schweren Komplex, wenn die Temperatur tief genug sinkt. Auch hier würde man die gewünschten Isotope anhand der Masse dieser Komplexe von den übrigen trennen.

Pro Prozessschritt ließe sich offenbar eine Anreicherung von 14 Prozent erreichen. Wie kommt man auf die für waffenfähiges Uran benötigten 80 Prozent?

Sandner: Wenn das Uranhexafluorid während eines Anreicherungsschritts nicht verunreinigt wird, kann man es einfach in die nächste Stufe stecken, den Prozess wiederholen und so den Gehalt an Uran-235 immer weiter erhöhen. Sollten jedoch Verunreinigungen auftreten, wird die Sache schwieriger. Aber auch das hängt vom Trennmechanismus ab – über den wir nichts wissen.

Angenommen, man kann damit Uran beliebig stark anreichern – könnte man Silex-Fabriken nicht genauso gut kontrollieren wie herkömmliche Anlagen?

Sandner: Nicht unbedingt. Zentrifugen werden häufig komplett oder als schwer zu tarnende Einzelteile gekauft; das fällt bei Rüstungskontrollen sofort auf. Silex ist hingegen modular aufgebaut, und die meisten Teile sind für sich genommen harmlos. Die Laser könnten auch zum Schweißen benutzt werden; zur Veränderung der Laserfrequenz genügt ein Hochdruck-Gaszylinder. Sonst braucht man nur noch Vakuumtanks und eventuell Kühlvorrichtungen, die ebenso unverdächtig sind. Silex-Anlagen können vermutlich viel kleiner gebaut werden als vergleichbare Zentrifugensysteme, die stets geräumige Fabrikhallen benötigen. Somit ließen sie sich leicht vor der Satellitenaufklärung verbergen: Sie wären kaum von einer großen Supermarkthalle zu unterscheiden. Das schafft ein Problem, denn bei der gegenwärtigen Lage der Dinge ist die Beobachtung aus dem Weltall eines der wichtigsten Instrumente, um verdächtige Anreicherungsstätten zu identifizieren.

Die Hersteller widersprechen dieser Behauptung. Sie betonen, dass auch Silex eine riesige Fertigungsanlage benötigen wird, und verweisen auf die Größe der Anlage in North Carolina.

Sandner: Dennoch spricht alles dafür, dass Silex deutlich kompakter sein kann als jede Zentrifugenanlage. Das gilt vielleicht nicht für das jetzige Demonstrationsobjekt, wohl

Ein riskantes Geschäft

Die Urananreicherung mittels Laser ist billiger und effektiver als andere Verfahren zur Gewinnung von Kernbrennstoff mit einem erhöhten Anteil des Isotops Uran-235. Kritiker mahnen, dass gerade diese Vorzüge die missbräuchliche Verwendung erleichtern – insbesondere die Proliferation, das heißt die Weitergabe von Kernwaffentechnik.

GASDIFFUSION

Kosten pro Trenngerät	Energiekosten	Proliferationsrisiko
130 €		

Da Uran-235 etwas leichter ist als Uran-238, durchquert es eine halbdurchlässige Membran ein wenig schneller.

GASZENTRIFUGE

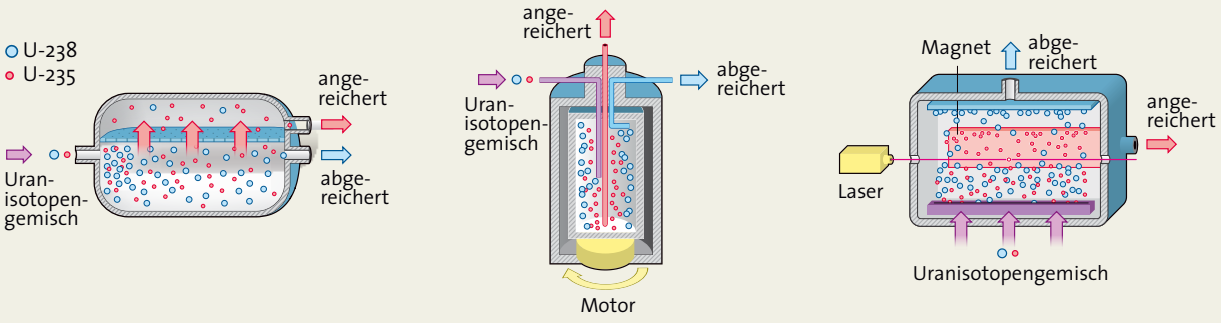
Kosten pro Trenngerät	Energiekosten	Proliferationsrisiko
80 €		

Eine rotierende Zentrifuge treibt das schwerere U-238 stärker zur Wand und reichert das leichtere U-235 in der Mitte an.

LASERANREICHERUNG

Kosten pro Trenngerät	Energiekosten	Proliferationsrisiko
25 €		

Ein Laser regt bevorzugt das U-235 an und ionisiert es. Dann trennen unbekannte Verfahren – etwa Magnete – die U-235-Ionen vom übrigen Isotopengemisch.



WEINBERGER, S.: LASER PLANT OFFERS CHEAP WAY TO MAKE NUCLEAR FUEL. IN: NATURE 487, S. 16–17, 2012, FIG. 1

aber auf lange Sicht. Ein effizienteres Verfahren ist meist auch kompakter, und wenn Silex nicht effizienter wäre, dann würde man die Fabrik wahrscheinlich nicht bauen.

Allerdings ist der Bombenbau mit Uran wohl eher etwas für atomare Einsteigernationen. Interessanter wäre Plutonium, da man davon weniger braucht, um eine kritische Masse zu erreichen. Eignet sich denn das Silex-Verfahren auch zur Plutoniumanreicherung?

Sandner: Das wäre rein theoretisch möglich, aber ich halte es für unwahrscheinlich. Allerdings wirbt die Firma Silex Systems damit, dass sie auch die Isotope anderer Elemente anreichern kann.

Die Homepage von Silex Systems nennt Silizium, das man für die Halbleiterherstellung benötigt, sowie Kohlenstoff und Sauerstoff für medizinische Diagnoseverfahren. Wird sich Teheran also bald Silex für eine neue Computerchip-Fabrik oder ein Krankenhaus einkaufen?

Sandner: Wenn sich dieses Knowhow unter einem zivilen Vorwand verbreiten könnte, sollten bei den Rüstungskontrolleuren alle Alarmglocken läuten.

Der Iran hat in der Vergangenheit behauptet, Isotope mit Hilfe von Laserlicht trennen zu können. Ist das plausibel?

Sandner: Im Labormaßstab ist das durchaus möglich. Jedes bessere Universitätslabor kann einzelne Atomisotope separieren. Schwierig wird es erst, wenn man das Verfahren auf Uran anwenden und im industriellen Maßstab nutzen will. Was das betrifft, kann ich nur hoffen, dass die Geheimhaltung des Silex-Verfahrens bisher gut genug funktioniert hat. Allerdings lässt sich niemals ausschließen, dass eine Technologie nochmals erfunden wird, insbesondere wenn bekannt ist, dass sie existiert. Aber sollte das jemandem gelingen, wird er der Letzte sein, der diese Tatsache veröffentlicht. Er würde das, was er weiß, nachzubauen versuchen und, falls er Erfolg hat, vermutlich nie öffentlich kundtun, dass er es kann.

»Was die Anreicherung betrifft, kann ich nur hoffen, dass die **Geheimhaltung** des Silex-Verfahrens bisher gut genug funktioniert hat«

Mit dem Silex-Verfahren könnte der Iran also die internationalen Rüstungskontrollen unterlaufen?

Sandner: Auf den Iran sind sämtliche Augen gerichtet, und da werden auch die Uranflüsse sehr gut kontrolliert. Ob just in diesem Fall das Silex-Verfahren ein zusätzliches Risiko birgt, scheint mir fraglich. Ich glaube, eine größere Gefahr geht von terroristischen Organisationen aus oder von Ländern, die bisher völlig unverdächtig waren.

Lässt sich der kommerzielle Ausbau der Technologie in den USA noch verhindern?

Sandner: Vermutlich nicht. Das hat seinen ganz normalen, gesetzmäßigen Weg genommen. Sämtliche Anhörungen fanden formal statt – wobei der Bericht über die Sicherheits-

relevanz des Vorhabens keinerlei Aussagen über die mögliche Proliferation der Technologie enthält. Es geht nur um die lokale Sicherheit, also darum, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass radioaktives Material entweicht oder es einen Betriebsunfall gibt. Wenn die beteiligten Firmen zu der Überzeugung kommen, es sei wirtschaftlich sinnvoll, dann steht dem Bau nichts mehr im Weg.

Sie sehen keinen Widerspruch zwischen der Kommerzialisierung des Silex-Verfahrens und der atomaren Abrüstung, zu der sich US-Präsident Barack Obama bekennt?

Sandner: Nein, denn dieses Verfahren sieht offiziell eine rein zivile Nutzung vor. Auch die DPG wendet sich nicht gegen das Verfahren als solches, denn es kann für verschiedene zivile Zwecke bis hin zur Anreicherung von Brennstoff in Kernkraftwerken sehr wertvoll sein. Zumal sich wie gesagt nicht von außen beurteilen lässt, ob damit überhaupt hoch angeregtes Uran hergestellt werden kann. Die Technologie ist in der Welt, wir können sie nicht rückgängig machen. Man muss aber wenigstens die Möglichkeit der unkontrollierten Verbreitung von atomwaffenfähigem Material verhindern.

Wie?

Sandner: Man sollte den Handel mit den Einzelkomponenten des Silex-Verfahrens beobachten und die Suche nach Urananreicherungsstätten so weit verfeinern, dass auch kleinere Anlagen erkannt werden. Silex ist eben ein Beispiel dafür, dass die Kernenergie ein Janusgesicht hat. Einerseits kann sie nützlich sein, andererseits trägt sie die Möglichkeit zum Atombombenbau in sich. Die DPG möchte sich mit dieser Diskussion nicht in die politische Frage einmischen, ob die Nutzung der Nuklearenergie durch Kernkraftwerke sinnvoll ist oder nicht. Aber im Fall von Silex wollen wir klar Stellung beziehen: Der unkontrollierten Verbreitung von Atomwaffen muss unbedingt Einhalt geboten werden. Hier haben wir als Physiker eine echte Verantwortung gegenüber der Gesellschaft.

Sollte man nicht, um ähnliche Entwicklungen künftig zu vermeiden, die kerntechnische Forschung auf gewisse Aspekte begrenzen, etwa darauf, wie sich Atommüll handhaben lässt?

Sandner: Forschung im Hinblick auf ihren Erkenntnisgewinn zu beschränken, ist ein Widerspruch in sich. Das Unbekannte ist nicht vorhersagbar, deswegen lässt es sich auch nicht einschränken. Man muss an die Ethik der Verantwortlichen appellieren und gesellschaftliche Kontrollen einführen, damit ein Missbrauch der Forschungsergebnisse ausgeschlossen wird.

Das Gespräch führte der freie Wissenschaftsjournalist **Robert Gast**.

ANZEIGE

Zum Nachdenken, Weiterdenken und Miteinanderreden

chrismon plus

Jeden Monat Geschichten über Menschen in außergewöhnlichen Situationen, hintergründige Reportagen und fundierte Kommentare.

Jetzt 3 Ausgaben gratis testen

Unser **Dankeschön** für Sie, wenn Sie nach dem Test chrismon plus weiterlesen: ein **Mini-Billardtisch.**

Bestellen Sie jetzt:

Internet: www.chrismon.de/testen
E-Mail: leserservice@chrismon.de
Telefon: 0800 / 758 75 37 (gebührenfrei)
Fax: 069 / 580 98-226

Eine tolle Geschenkidee für das ganze Jahr!

Die Zeitschrift für Naturwissenschaft, Forschung und Technologie.
12 Ausgaben; € 84,– (ermäßigt € 69,90)

Das Magazin für Psychologie und Hirnforschung. 10 Ausgaben; € 68,– (ermäßigt € 55,–)

Die Kompetenz in Sachen Astronomie und Weltraumforschung. 12 Ausgaben; € 85,20 (ermäßigt € 64,–)

Die neuesten Erkenntnisse aus dem Bereich der Life Sciences.
4 Ausgaben; € 29,60
(ermäßigt € 25,60).

Der aktuelle Wissensstand der NWT-Forschung.
4 Ausgaben; € 29,60
(ermäßigt € 25,60)

Deutschlands erstes wöchentliches Wissenschaftsmagazin (PDF-Format; optimiert für alle digitalen Endgeräte)
€ 39,95 (ermäßigt € 30,–)

Bestellen Sie für sich oder als Geschenk:
www.spektrum.com/weihnachten

per E-Mail:
service@spektrum.com

telefonisch:
06221 9126-743

per Fax:
06221 9126-751

Die Vorteile eines Geschenkabonnements

- Sie verschenken ein ganzes Jahr lang anspruchsvolle und topaktuelle Berichte aus der spannenden Welt der Wissenschaft.
- Auf Wunsch erhält der Beschenkte pünktlich zum Fest das erste Heft mit einer schönen Grußkarte in Ihrem Namen.
- Alle Ausgaben werden pünktlich frei Haus geliefert, keine Ausgabe wird verpasst.

Ihr Geschenk zur Wahl

1. Kalender »Himmel und Erde 2013«
2. Tasche »Allrounder« von Reisenthel
3. Audio-CD Sternstunden des Universums
4. Buch – Digitale Demenz
5. DVD – Planet des Lebens
6. Smartphonehülle – Babuschka
7. Multifunktionsmesser No. 8 von Opinel
8. Spektrum Notizbuch

Bücher und mehr – Zum Ver- und Selberschenken

W. Engländer, H.-H. Bergmann

DIE GROSSE KOSMOS VOGELSTIMMEN-DVD

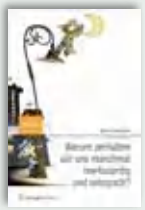
220 Vögel, Filme und Stimmen

2012, 2 DVDs, Begleitbuch, in Box, INFO-Progr. gem. § 14 JuSchG., Kosmos

Bestell-Nr. 1859

€ 49,99 (D), € 49,99 (A)

220 Vogelarten mit ihren Rufen und Gesängen erfreuen uns durch wunderschöne Bilder in Filmen, die Vögel singen dabei schnabelsynchron! Auf der ersten DVD werden 110 Singvögel, auf der zweiten DVD 110 Nicht-Singvögel vorgestellt. Ein Sprecher erklärt jede Darstellung, das Begleitbuch informiert noch ausführlicher.



Sylvain Delouvée

WARUM VERHALTEN WIR UNS MANCHMAL MERKWÜRDIG UND UNLOGISCH?

2012, 192 S. m. 87 SW-Abb., kart., Spektrum

Bestell-Nr. 3725

€ 14,95 (D), € 15,40 (A)

Wie wird unser Verhalten durch andere beeinflusst? Warum nur tun wir manchmal unlogische, merkwürdige oder irrationale Dinge? In amüsanter und unterhaltsamer Weise entschlüsselt Sylvain Delouvée das irrationale Verhalten der Menschen.

Peter M. Higgins

DAS KLEINE BUCH DER ZAHLEN

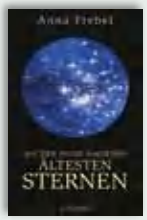
Vom Abzählen bis zur Kryptographie

2012, VIII, 348 S. m. 35 Abb., kart., Spektrum

Bestell-Nr. 3748

€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Peter Higgins verarbeitet Jahrhunderte des Fortschritts zu einer erbaulichen Erzählung, die das Geheimnisvolle der Zahlen hervorhebt und erklärt, wie die verschiedenen Arten von Zahlen aufgetaucht sind und weshalb sie nützlich sind. Das Buch enthält viele historische Anmerkungen und interessante Beispiele, und es behandelt einfache Zahlenrätsel und Zaubertricks ebenso wie Verbindungen zu Problemen des Alltags.



Anna Frebel

AUF DER SUCHE NACH DEN ÄLTESTEN STERNEN

2012, 352 S., m. zahlr. Abb., geb., Fischer

Bestell-Nr. 3684

€ 19,99 (D), € 20,60 (A)

Mit Mitte zwanzig entdeckte Anna Frebel während ihrer Promotion den ältesten bis dahin bekannten Stern. Diese ältesten bekannten Objekte überhaupt geben über die ersten Sterne im Universum und die Entstehung der chemischen Elemente Auskunft – dadurch werden sie ein Schlüssel zum Verständnis des gesamten Universums. Anna Frebel gibt klar und verständlich Einblicke in diesen Aspekt der Astronomie und berichtet von ihrer konkreten Arbeit mit den Teleskopen in fernen Gegenden der Welt.

Udo Gansloßer, Kate Kitchenham

FORSCHUNG TRIFFT HUND

Neue Erkenntnisse zu Sozialverhalten, geistigen Leistungen und Ökologie

2012, 240 S. m. 250 Farbabb., geb., Kosmos

Bestell-Nr. 3751

€ 29,99 (D), € 30,90 (A)

Immer mehr Forschungsprojekte in Europa und den USA befassen sich mit dem Haushund, seiner Entwicklung, seinem Verhalten, seiner Intelligenz und seinen Emotionen. Dr. Udo Gansloßer und Kate Kitchenham berichten über die Forscher und ihre Arbeit, fassen die interessantesten Ergebnisse zusammen und geben damit Hundehaltern Anleitung für ein besseres Verständnis ihres Vierbeiners.

Richard Dawkins

DER ZAUBER DER WIRKLICHKEIT

Die faszinierende Wahrheit hinter den Rätseln der Natur

2012, 288 S. m. zahlr. Abb., geb., Ullstein

Bestell-Nr. 3752

€ 26,99 (D), € 27,80 (A)

Seit jeher hat die Menschheit versucht, sich die rätselhafte Natur durch Mythen begreiflich zu machen. Auf den Herbst folgt der Winter, weil Hades, Persephone in sein Reich entführt hat und die blühende Natur mit ihr; in Wirklichkeit gibt es unterschiedliche Jahreszeiten, weil die Erdachse geneigt ist. Und die Welt entstand auch nicht, weil der indische Gott Vishnu seinem Diener Brahma ihre Erschaffung auftrug, sondern durch den Urknall. So wunderbar die Mythen sind, weitaus spannender ist die wissenschaftliche Betrachtung. Genau das tut Dawkins, indem er die Wahrheit hinter den Rätseln erklärt. Ein faszinierendes, üppig illustriertes Buch, das den Zauber der Wirklichkeit feiert.

Bestellen Sie direkt: +49 6221 9126-841 @ info@science-shop.de

Alexander Unzicker

AUF DEM HOLZWEG DURCHS UNIVERSUM

Warum sich die Physik verlaufen hat

2012, 304 S. m. Abb., geb., Hanser

Bestell-Nr. 3719

€ 19,90 (D), € 20,50 (A)

Keine Disziplin treibt so seltsame Blüten wie die Physik: Spekulationen über Paralleluniversen etwa, die mit Wissenschaft nicht mehr viel zu tun haben. Gleichzeitig sind grundlegende Fragen der Physik noch immer unbeantwortet. Doch statt Lösungsansätze von Einstein oder Dirac aufzugreifen, verwendet man lieber Milliarden auf die Suche nach neuen Teilchen und mutmaßt über verborgene Dimensionen. Alexander Unzicker liest der Physik die Leviten – und weist ihr den Weg aus dem Labyrinth, in dem sie sich verlaufen hat.

Ken Taylor

KOSMISCHE KULTSTÄTTEN DER WELT

Von Stonehenge bis zu den Maya-Tempeln

2012, 240 S. m. 200 Farbabb., geb., Kosmos

Bestell-Nr. 3638 € 29,99 (D), € 30,90 (A)

Überall auf der Welt zeigen beeindruckende Bauten das himmelskundliche Wissen unserer frühen Vorfahren. In diesem reich bebilderten Buch beschreibt der Archäologe Ken Taylor ausführlich über fünfzig bedeutende Kultstätten auf der ganzen Welt.

Werner Gruber, Heinz Oberhummer, Martin Puntigam

GEDANKENLESEN DURCH SCHNECKENSTREICHELN

Was wir von Tieren über Physik lernen können

2012, 296 S., geb., Hanser

Bestell-Nr. 3648

€ 19,90 (D), € 20,50 (A)

In *Gedankenlesen durch Schneckenstreicheln* begeben sich die beiden Physiker Heinz Oberhummer und Werner Gruber sowie der preisgekrönte Satiriker Martin Puntigam auf eine Reise ins Tierreich. Dabei stoßen sie auf faszinierende wissenschaftliche Phänomene. Wissenschaft für alle: Spektakulär, lehrreich und unterhaltsam.

WUNDER DES UNIVERSUMS

BBC

2012, Laufzeit ca. 200 Min., Verlag: Polyband

Bestell-Nr. 3656

€ 14,99 (D), € 14,99 (A)

Die Dokumentation nimmt Sie mit auf eine Entdeckungsreise quer über unseren Planeten, von den verbrannten Ebenen Afrikas hin zu den schneebedeckten kanadischen Rockies. Diese Reisen quer über unseren Planeten werden mit spektakulären Bildern aus dem Weltraum kombiniert. Mittels beeindruckender Bilder aus Teleskopen und computergenerierten HD-Aufnahmen liefert *Wunder des Universums* Eindrücke von gigantischen Supernovae, Gammastrahlenexplosionen und kürzlich entdeckten Galaxien und gibt Aufschluss über die entferntesten Bereiche des Universums. Sprachen: Deutsch und Englisch; INFO-Programm gem. §14 JuSchG.

Dava Sobel

UND DIE SONNE STAND STILL

Wie Kopernikus unser Weltbild revolutionierte

2012, 283 S. m. Abb., geb., Berlin Verlag

Bestell-Nr. 3697

€ 22,99 (D), € 23,70 (A)

Ein geheimnisvolles Manuskript, eine unerhörte Begegnung, der Sturz eines Weltbilds – das ist der Stoff dieser Biographie! Elegant erzählt Dava Sobel die Geschichte der Kopernikanischen Revolution und bettet sie ein in die Geschichte der Astronomie von Aristoteles bis zum Mittelalter.

Bequem bestellen:

→ direkt bei www.science-shop.de

→ per E-Mail info@science-shop.de

→ telefonisch +49 6221 9126-841

→ per Fax +49 711 7252-366

→ per Post Postfach 810680 • 70523 Stuttgart

Für Bestellungen außerhalb Deutschlands und Österreichs berechnen wir € 3,50 Versandkosten. Alle Preise inkl. Umsatzsteuer. Preise unter Vorbehalt. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH

CHRISTBÄUMCHEN: FOTOLIA / PIXI

Jörg Resag

ZEITPFAD

Die Geschichte unseres Universums und unseres Planeten

2012, 400 S. m. 177 Farbabb., geb., Spektrum Akademischer Verlag

Bestell-Nr. 3644

€ 29,95 (D), € 30,80 (A)

Das durchgängig vierfarbige und reich illustrierte Buch des Physikers Jörg Resag stellt das moderne Gesamtbild der Naturgeschichte umfassend dar und lädt den Leser zu einer Zeitreise ein, die beim Urknall beginnt und bis in die Zukunft des Universums führt.

Stuart Clark

KOSMISCHE REISE

Von der Erde bis zum Rand des Universums

2012, 240 S. m. 200 Farbabb., geb., Spektrum Akademischer Verlag

Bestell-Nr. 3645

€ 39,95 (D), € 41,10 (A)

Begeben Sie sich auf eine intergalaktische Mission, die Sie durch einen Raum von Hunderten von Trilliarden Kilometern und durch eine Zeitspanne von über 13 Milliarden Jahren führt. Mehr als 300 spektakuläre astronomische Aufnahmen und informative Texte vermitteln nachhaltige Eindrücke von den 101 Stationen dieser großartigen kosmischen Reise.

Christian Hesse

CHRISTIAN HESSES MATHEMATISCHES SAMMELSURIUM

1 : 0 = ∞

2012, 256 S. m. 40 z. Tl. farb., kart., Beck

Bestell-Nr. 3721

€ 14,– (D), € 14,40 (A)

Unentbehrlich x Unermesslich x Unverbesserlich = Hesses mathematisches Sammelsurium. Und zwar für alle: vom manischen Mathematiker bis zum Zahlenangsthasen. Das Buch ist eine flammende Hommage an die Mathematik nach gut dreißigjähriger Beschäftigung mit ihr aus nächster Nähe.

Alice Roberts (Hg)

DIE ANFÄNGE DER MENSCHHEIT

Vom aufrechten Gang bis zu den frühen Hochkulturen

2012, 256 S. m. über 800 farbige Abb. u. Ktn., geb., Dorling Kindersley

Bestell-Nr. 3718 **€ 29,95 (D),** € 30,80 (A)

Dieses imposante Werk dokumentiert mit mehr als 800 Abbildungen die Geschichte der menschlichen Evolution. Dabei geht es nicht nur um die biologische, sondern auch um die kulturelle Entwicklung bis zu den frühen Hochkulturen. Mit beeindruckende Schädelrekonstruktionen von den niederländischen Präparatoren und Künstlern Adrie und Alfons Kennis.

Anthony Kenny

GESCHICHTE DER ABENDLÄNDISCHEN PHILOSOPHIE, 4 BÄNDE

Antike – Mittelalter – Neuzeit – Moderne

2012, 1408 S. m. zahlr. SW-Abb., geb., Primus

Bestell-Nr. 3654

Einführungspreis € 99,90 (D), € 102,70 (A)

gültig bis 01.02.2013, danach kostet das Werk € 149,–

Die 4 Bände sind zum Preis von je € 49,90 auch einzeln erhältlich. Sparen Sie mit der günstigen Gesamtausgabe!

Diese Philosophiegeschichte setzt neue Maßstäbe! Dem britischen Philosophen Anthony Kenny ist etwas gelungen, wonach man im deutschen Sprachraum vergeblich sucht: eine ohne Vorkenntnisse verständliche, ja sogar unterhaltsam geschriebene Philosophiegeschichte von den Anfängen bis zur Gegenwart. In seinem vierbändigen Werk erzählt Kenny die Philosophiegeschichte. Dabei verbindet er gekonnt die Darstellung der Ereignisgeschichte und einzelner Denker mit einer Erläuterungen der Problemgeschichte und philosophischen Argumentation.

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich

Jürgen Beetz

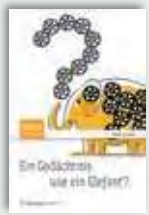
1+1=10: MATHEMATIK FÜR HÖHLENMENSCHEN

2012, X, 340 S. m. 100 Abb., kart., Spektrum

Bestell-Nr. 3731

€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Mehr als die einfache Logik eines Frühmenschen brauchen Sie nicht, um die Grundzüge der Mathematik zu verstehen. Denn Sie treffen in diesem Buch viele einfache, fast gefühlsmäßig zu erfassende mathematische Prinzipien des täglichen Lebens. Eine umfassende Übersicht über die »gesamte« Mathematik (definiert durch Abitur- bzw. Erstsemester-Level).



Alain Lieury

EIN GEDÄCHTNIS WIE EIN ELEFANT?

Tipps und Tricks gegen das Vergessen

2012, 320 S. m. 57 SW-Abb., kart., Spektrum

Bestell-Nr. 3727

€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Humorvoll geschrieben und bestückt mit zahlreichen Beispielen bietet dieses heitere und zugleich lehrreiche Werk einen Überblick über die unterschiedlichen Bereiche der Gedächtnisforschung und Methoden zur Steigerung der Gedächtnisleistung.

Besuchen Sie uns im Internet unter:
www.science-shop.de

Wolfgang W. Osterhage

STUDIUM GENERALE PHYSIK

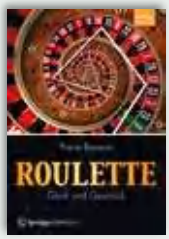
Ein Rundflug von der klassischen bis zur modernen Physik

2012, 288 S. m. 80 SW-Abb., 7 Tabellen., geb., Spektrum

Bestell-Nr. 3749

€ 24,95 (D), € 25,70 (A)

Dieses Buch nähert sich den großen Komplexen der Physik, ohne Spezialistenwissen vermitteln zu wollen. Dabei werden zunächst die Grundlagen der klassischen Physik erörtert: Mechanik, Elektrizitätslehre, Felder, Wellen und Wärmelehre. Auf dieser Basis werden dann die wesentlichen Erkenntnisse der Quantenphysik (Atomphysik, Kernphysik) einerseits und der Kosmologie (Relativitätstheorie) andererseits bis zum aktuellen Wissensstand entwickelt; ein Buch, geschrieben für alle, die in die Physik einsteigen oder sich (nochmal) einen Überblick verschaffen wollen – mit vielen weiterführenden Literaturhinweisen und Gedanken zum Weiterdenken.



Pierre Basieux

ROULETTE – GLÜCK UND GESCHICK

2012, 450 S. m. 143 SW-Abb., geb., Spektrum

Bestell-Nr. 3743

€ 69,95 (D), € 72,– (A)

Pierre Basieux, promovierter Mathematiker, hat die wissenschaftliche und praktische Erforschung dieses Spiels nicht nur einige Jahrzehnte als Hobby betrieben, sondern es auch revolutioniert. Über das bereits Bekannte hinaus enthält sein Buch vor allem a) entscheidende Ergänzungen, die bisher in Buchform absichtlich nicht preisgegeben wurden, b) neue praktische Aspekte, vor allem in den Bereichen Wurfweitenspiel und Kesselgucken, und c) wesentliche Vereinfachungen, die sich aus diesen neuen praktischen Erkenntnissen ergeben.

Gustave-Nicolas Fischer, Virginie Dodeler

WIE GEDANKEN UNSER WOHLBEFINDEN BEEINFLUSSEN

Auswirkungen der Psyche auf die Gesundheit

2012, 288 S. m. 51 SW-Abb., kart., Spektrum

Bestell-Nr. 3726

€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Was heißt eigentlich »gesund sein«? Wenn es der Seele gut geht, so hat dies auch positive Auswirkungen auf das körperliche Wohlbefinden. Gustave-Nicolas Fischer und Virginie Dodeler stellen die wichtigsten 100 Aha-Experimente auf diesem Gebiet kurzweilig und anschaulich dar. Durch die daraus resultierenden erstaunlichen Entdeckungen wird jeder Leser den Einfluss der Psyche auf die Gesundheit noch besser verstehen. Dazu gibt es praktische Lösungsansätze zur Begleitung auf dem Weg zum physischen Wohlbefinden.

LERNPAKET EXPERIMENTE MIT DEM STIRLINGMOTOR

2012, Stirlingmotor, Generator, Steckbrett, 20 Bauteile und Handbuch, Franzis

Bestell-Nr. 3526 € 149,90

Dieses Franzis-Lernpaket enthält ein voll funktionsfähiges Stirlingmotor-Modell, einen elektrischen Generator, ein Experimentiersteckbrett und viele weitere Elektronikbauteile. Damit können Sie Funktionsweise und Einsatzmöglichkeiten des Stirlingmotors praktisch erfahren und erforschen. Das Modell ist komplett vormontiert und kann nach dem Zusammenbau des Brenners sofort in Betrieb genommen werden. Dazu brauchen Sie nichts weiter als handelsüblichen Brennspiritus (nicht enthalten). Das Handbuch führt vom einfachen Bauteil zum fertigen Projekt. Die physikalischen Grundlagen und die unterschiedlichen Typen der Stirlingtechnik werden genau erklärt.

Ulrich E. Stempel

LERNPAKET EXPERIMENTE MIT ULTRASCHALL

2012, 2 Ultraschallsensoren, 2 Steckboards, Fledermausohr und viele Bauteile, Experimentierhandbuch mit 160 S., Franzis

Bestell-Nr. 3533 € 49,95 (D), € 49,95 (A)

Dieses Lernpaket vermittelt die Grundlagen der Ultraschalltechnik und führt Sie mit spannenden Experimenten zu vielen interessanten Einsatzmöglichkeiten. Große Vorbereitungen sind nicht notwendig – Sie können sofort loslegen und forschen. Dabei lernen Sie auch die Hintergründe praktischer Ultraschallanwendungen kennen, die aus unserem modernen Alltag nicht mehr wegzudenken sind – sei es in der Medizin oder im wissenschaftlich-technischen Bereich.
Hier werden ständig neue, verblüffende und oft wegweisende Möglichkeiten entwickelt. Löten nicht erforderlich.

STIRLING-AUTO A1 FERTIGMODELL

Schrauben aus Edelstahl, Seitenteile aus poliertem Edelstahl, Räder aus Vollmessing mit rundem Gummibelag, Gabel und Kühlergrill aus Aluminium, Maße: 13 x 16 x 8,7 cm, Gewicht: 1.200 Gramm, Böhm

Bestell-Nr. 3475 € 398,– (D), € 398,– (A)

Robert Stirling, der Erfinder des Stirlingmotors, und Carl Benz haben eines gemein: Sie erhielten Patente für außergewöhnlich revolutionäre Technik. Im Stirling-Auto A1 wurden die Ideen dieser beiden Entwickler zusammengeführt. Die feinen Messingspitzen erinnern an die Pickelhauben aus der Kaiserzeit und an die historischen Automobile aus der Zeit um 1885.
Weitere Infos: www.science-shop.de/artikel/1130551
Hier können Sie auch einen Film über das Auto sehen.

DAMPFMASCHINE »MINI BEAM« – FERTIGMODELL

Länge: 106 mm, Breite: 49 mm, Höhe: 73 mm (über Schornstein), Kolbendurchmesser: 7 mm, Hub: 7 mm, Steuerung: Schiebersteuerung, doppelseitig wirkend, Gewicht: 96 g, Laufzeit: ca. 5 Min. mit einer Wasserfüllung, Hielscher

Bestell-Nr. 3535 € 149,50

Die ersten funktionsfähigen Dampfmaschinen, die um 1750 zum industriellen Einsatz kamen, waren Beam=Balken=Balance, alles Maschinen mit einem auf einer Mittelsäule liegenden Balken: sowohl die atmosphärische Dampfmaschine von Thomas Newcomen von 1712 als auch die Niederdruckmaschine von James Watt um 1769. Unser Modell, die kleinste, doppelseitig wirkende Beam-Dampfmaschine, wurde von Lutz Hielscher entwickelt. Mit Abdampfkondensator und aus Edelstahl, Messing und Aluminium.

Ebenfalls lieferbar als Bausatz:

DAMPFMASCHINE »MINI BEAM« – BAUSATZ

Bestell-Nr. 3536 € 136,50

PIEPEI GOLD

Das perfekte Frühstücksei für jeden Feinschmecker

Mit echtem Gold veredelt, Brainstream

Bestell-Nr. 2700
€ 24,90 (D), € 24,90 (A)

Einfacher und präziser können Frühstückseier nicht gekocht werden. Das PiepEi misst die Wassertemperatur und berechnet daraus über eine Differenzialgleichung die Innentemperatur im Ei. Erreicht die Temperatur im Eigelb 62 °C, so erklingt eine Melodie. Man kann den Kochvorgang auch mit kaltem Wasser starten.

Bestellen Sie direkt: +49 6221 9126-841 @ info@science-shop.de

POWERLUX – LEUCHTLUPE KALTWEISS

Linsengröße: Ø 58 mm, cera-tec®, Vergrößerung: 28 dpt / 7x (Doppellinse), punktgenaue Ausleuchtung, Abschaltautomatik nach 30 Min., Lichtfarbe: kaltweiß, ca. 8000 K, Hartschaumetui. Benötigt werden 3 Mignon Batterien, im Lieferumfang enthalten, made in Germany, Eschenbach

Bestell-Nr. 3476 € 99,– (D), € 99,– (A)

Die neue Generation der Leuchtlupe – in einer neuen geometrischen Gestaltung. Die einzigartige und vertraute Form der Computermaus hat sich millionenfach bewährt und sorgt für eine entspannte Handhaltung auch bei längerem Gebrauch.

- liegt sehr gut in der Hand
- sehr einfache, intuitive Führung auf dem Lesegut durch kompakte Bauform
- gleichmäßig helle und blendfreie Ausleuchtung durch zwei SMD-LED

CAZORLA 8 x 56 PREMIUM

Fernglas mit Tragetasche aus Nylon

Achtfache Vergrößerung, Öffnung: 56 mm, hohe Vergütung, Gewicht: 1150 g, Pentaflex

Bestell-Nr. 3665 € 189,–

Ein hochwertiges Allround-Fernglas für alle Naturfreunde: Für die Astronomie bis zur Tier- und Landschaftsbeobachtung geeignet. Dank rutschfester Gummiarmierung liegt es gut in der Hand und ist hervorragend gegen Feuchtigkeit geschützt.

MENDOCINO-MOTOR, FERTIGMODELL

Im Magnetfeld frei schwebender Solarmotor

Rotor aus Acrylglas, Bodenplatte aus Echtglas, Maße: 20 x 10 x 10 cm, Carl Aero

Bestell-Nr. 3652 € 159,–

Dieser Solar-Elektromotor ist eine Konstruktion, die schon auf den ersten Blick Aufmerksamkeit erregt. Oft wird erstaunt gefragt, wie sich ein solcher frei schwebender Körper überhaupt in Bewegung versetzt.

Der Motor verfügt über eine Lagerung aus sechs Hochleistungs-Neodym-Magneten. Dadurch scheint der Anker des Motors frei im Raum zu schweben. Der Anker selbst ist mit hocheffizienten monokristallinen Solarzellen bestückt. Diese liefern nur dann Strom, wenn sie sich im Lauf der Drehbewegung jeweils auf der Oberseite befinden. Die Kommutation dieses Motors findet auf optischem Weg statt.

Ein Video zum *Mendocino-Motor* finden Sie hier:
www.science-shop.de/artikel/1156118

Ebenfalls lieferbar als Bausatz (Löten erforderlich):
Bestell-Nr. 3653 € 139,–

Die Wissensbecher aus hochwertigem Porzellan sind ein schönes und nützliches Geschenk!

Höhe: 105 mm; Inhalt: 460 ml, spülmaschinengeeignet, Könitz Porzellan

WISSENSBECHER MATHEMATIK

Bestell-Nr. 3430 € 9,95

WISSENSBECHER PHYSIK

Bestell-Nr. 3431 € 9,95

WISSENSBECHER CHEMIE

Bestell-Nr. 3432 € 9,95

Für Bestellungen außerhalb Deutschlands und Österreichs berechnen wir € 3,50 Versandkosten. Alle Preise inkl. Umsatzsteuer. Preise unter Vorbehalt. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH

LERNEN WIR VON SISYPHOS

Sandsteinobjekt

Zinkfigur von Hand gebogen, Sandsteinsockel von Hand gegossen, Größe: 11 x 20 x 3,5 cm (H x B x T), Gewicht: 620 g, invocem

Bestell-Nr. 3662 € 39,90

Aufgaben, die trotz großer Mühen so gut wie nie erledigt werden, nennt man Sisyphosarbeit. Das Objekt ist eine Erinnerung, größere Projekte in abgrenzbaren Schritten zu erledigen und diese Schritte immer wieder abzusichern. Diese Absicherung symbolisiert der in den Sockel eingelassene Keil.

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich

DON'T WORRY, BE HAPPY

Betonobjekt

Betonobjekt von Hand gegossen. Die in der Scheibe angedeuteten Mundwinkel können durch eine 180°-Drehung verändert werden, Größe: 10x17x4 cm (HxBxT), Gewicht: 500 Gramm, invocem

Bestell-Nr. 3663 € 29,90

Mundwinkel rauf – lassen Sie sich nicht unterkriegen!

Alle Fünfe mal gerade sein lassen, gelassen über Dinge hinwegsehen. Es ist nur ein einfacher Dreh. Und häufig sieht die Welt schon wieder anders aus ...

ALBERT-EINSTEIN-BÜSTE

aus Biskuitporzellan

Höhe: 14,5 cm, in weißer Geschenkschachtel; Kämmer

Bestell-Nr. 3651 € 24,90

Ein Schmuckstück für Regal oder Schreibtisch!

Die 14,5 cm hohe Büste wird gegossen, bei 1350 Grad gebrannt und anschließend poliert. Durch das Polieren des Biskuitporzellans erhält die Büstenoberfläche einen feinen, seidenmatten Glanz. Made in Germany!

ZAHLEN AM LAUFENDEN METER

Albrecht Beutelspachers Mathezollstock

2012, Maße: 24 x 1,6 x 2,8 cm, Metermorphosen

Bestell-Nr. 3650 € 12,90

Der Mathe-Meterstab zeigt Wissenswertes und Überraschendes aus der Welt der Zahlen und Formeln am laufenden Meter: von Pythagoras über Archimedes und Gauß bis zu dem indischen Zahlengenie Ramanujan.

Besuchen Sie uns im Internet unter:
www.science-shop.de

IPSOL 4/4S SOLAR

Ladeschale mit eingebautem 2400-mAh-Lithium-Polyme-Akku für Iphone 4/4S

mit Micro USB-Kabel, Farbe: schwarz, Inprosolar

Bestell-Nr. 3716 € 89,–

Die Ladeschale verschmilzt mit dem iPhone zur einer Einheit. Sie ist sehr ergonomisch in der Handhabung und löst mit dem zusätzlichen Energiespeicher jedes Problem des täglichen Nachladens.

Und wenn mal keine Energie in beiden Speichern vorliegt, sorgt das Solarmodul für eine vernünftige Notstromversorgung: **1 Stunde in der Sonne laden ermöglicht 1 Stunde telefonieren.**

DAS BAUMEISTERSPIEL KLASSIK

Unendliche Vielfalt

Format 12,5 x 12,5 cm, blaue Steine mit grauer Platte aus Recyclingkunststoff, Logika Spiele

Bestell-Nr. 3616 € 16,–

Acht verschieden gestaltete Bausteine, die jeder für sich aus mehreren Einzelwürfeln bestehen, werden auf einer Grundplatte zu den unterschiedlichsten Formen zusammengebaut. Mit seiner unerschöpflichen Vielfalt weckt es den Spielspaß und schult so spielerisch Gedächtnis, Konzentration, Geduld, Intelligenz und erst recht räumliches Vorstellungsvermögen, Fantasie, Intuition, laterales Denken. Für 1 Spieler.

NACHTSICHTGERÄT NIGHT EYE 3x42

Restlicht- und IR-Licht-Verstärker, Vergrößerung: 3-fach, Ø Objektiv: 42 mm. Benötigt wird eine CR123A-Batterie (nicht im Lieferumfang enthalten), Omegon

Bestell-Nr. 3655 € 199,–

Das *Night Eye* ist ein Restlichtverstärker und funktioniert mit einem Bildwandler, der das Licht um das etwa 1000-Fache verstärkt. Ist Restlicht vorhanden, sind Beobachtungen bis zu 200 Meter Distanz möglich. Und bei absoluter Dunkelheit wird mit einem weiteren Knopfdruck der IR-Licht-Verstärker eingeschaltet. *Night Eye* ist kompakt und mit einer Hand bedienbar.

DIE KNOTENBOX

50 Knoten-Klassiker für Freizeit, Sport und Alltag

Mit 2 Schnüren zum Üben in Metallbox, moses

Bestell-Nr. 3617 € 12,95

Der Seemann kann in jeder Lebenslage den richtigen Knoten knüpfen. Aber mit der Knotenbox lernen auch wir Landratten 50 bewährte Knoten mit Hilfe von 50 handlichen Karten und 2 Schnüren. Mit anschaulichen Schritt-für-Schritt-Abbildungen und wissenswerten Sachinformationen rund um Entstehung, Gebrauch und Anwendung der Knoten.

Von wegen ausgestorben! Diese coolen Tectors-Puzzles erwecken die Urzeitriesen wieder zum Leben: Die imposanten Gestalten aus der Urzeit müssen die Kinder zunächst aus vielen kleinen und großen Holzteilen zusammenstecken – ganz ohne Klebstoff und Werkzeug! Ab 8 Jahren

Die Dinosauerier haben einen eingebauten Motor und Geräusch-Sensor: Klatsche in die Hände und dein Tector-Saurier brüllt und läuft!

TECTOR STEGOSAURUS

3-D-Puzzle mit 75 Holzteilen, brüllt und läuft und reagiert auf Geräusche, Maße ca. 32 x 16 cm, man benötigt 3 x 1,5-V-AAA-Batterien (nicht enthalten), Moses

Bestell-Nr. 3744 € 24,95

TECTOR TRICERATOPS

3-D-Puzzle mit 75 Holzteilen, brüllt und läuft und reagiert auf Geräusche, Maße ca. 32 x 16 cm, man benötigt 3 x 1,5-V-AAA-Batterien (nicht enthalten), Moses

Bestell-Nr. 3745 € 24,95

VIDEO-HELICOPTER SAFARI RTF/ GSY/3+3CH/MHZ

Mit abnehmbarer Kamera für Foto- und Videoaufnahmen und LED-Beleuchtung

L x B x H: 365 x 85 x 175 mm, Ø Hauptrotor: max. 360 mm / 70 mm, Fluggewicht: 270 g, Laden über beiliegendes Ladegerät, Controller mit 6 x 1,5-V-AA-Batterien (nicht enthalten), Revell

Bestell-Nr. 3717 € 99,–

Ready-to-Fly-MHz-Helikopter in auffälligem Design mit abnehmbarer Kamera für Foto- und Videoaufnahmen und über die Fernsteuerung schaltbarer LED-Beleuchtung. Der Helikopter hat sehr gute Flugeigenschaften durch das elektronische Kreiselsystem (Gyro) und ist gut beherrschbar. Das Laden erfolgt über das mitgelieferte Ladegerät. Indoorgeeignet – Outdoor nur bei Windstille. Einsteigermodell, ab 15 Jahren.

DAS PRESTEL KUNSTSPIEL

Für die ganze Familie

2012, Spielplan mit Drehscheibe, 50 Bildkarten, 1 Holz-Spielfigur, 1 Holzwürfel, Säckchen mit Aufgabenkarten, 5 Puzzles, Prestel

Bestell-Nr. 3682 € 24,99 (D), € 24,99 (A)

Die Scheibe drehen, schon geht es los: Theater, Pantomime, Gemälde beschreiben, Fragen beantworten. In diesem Spiel sind Fantasie und Vielseitigkeit gefragt, ein scharfes Auge und ein gutes Gedächtnis. Jedes Spielfeld steht für einen Bereich der Kunst und ist mit einer Aufgabe verbunden. Wer sie löst, erhält ein Puzzlestück. Doch wer Pech hat, kann es auch wieder verlieren. Gewinner ist, wer als Erster alle Teile seines Gemäldes zusammengepuzzelt hat. Ab 8 Jahren.

Für Bestellungen außerhalb Deutschlands und Österreichs berechnen wir € 3,50 Versandkosten. Alle Preise inkl. Umsatzsteuer. Preise unter Vorbehalt. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH

Kalender – Schöne Begleiter durchs Jahr

STERNZEIT

Kalendarium dtsch.-engl., 13 farb. Blätter, Maxi-Format: 70 x 50 cm, Palazzi Verlag

Bestell-Nr. 1335 **€ 44,80**

Modernste Teleskope geben uns verblüffende Ausblicke und tiefe Einblicke in die Struktur und Entwicklung des Universums. Mit informativen Texten und Detail-Abbildungen.

HIMMEL UND ERDE

13 farb. Blätter, Format: 55,5 x 45,5 cm, Spiralbindung, Weingarten

Bestell-Nr. 1338 **€ 32,–**

In diesem Kalender von *Sterne und Weltraum* präsentieren Astronomen zwölf faszinierende Aufnahmen von Sternen, Planeten und dem Weltraum. Das Kalendarium bietet zusätzlich Hinweise auf wichtige Himmelsereignisse im Jahr 2013.

Bestellen Sie direkt: **+49 6221 9126-841** **info@science-shop.de**

NATURTAFELN

Mit Zweimonats-Kalendarium, 7 farb. Blätter, Format: 49,5 x 68,5 cm, DuMont

Bestell-Nr. 2878
€ 26,99

Sechs Schreiber-Tafeln zu interessanten Wissensgebieten aus Flora und Fauna mit vielen detailgetreuen Abbildungen befinden sich in diesem Kalender. Bleiben Sie ein Jahr lang der Natur auf der Spur!

WEGE

Kalendarium dreisprachig, mit Jahresübersicht, 13 farb. Blätter, Format: 48 x 54 cm, Ackermann

Bestell-Nr. 2433 **€ 29,95**

Sie wissen doch: Der Weg ist das Ziel! Wege durch interessante Landschaften in den jeweiligen Jahreszeiten – wunderschön fotografiert.

VERBORGENE WELTEN

Kalendarium mehrsprachig, 13 farb. Blätter, Format: 49,5 x 68,5 cm, DuMont

Bestell-Nr. 2176 **€ 34,99**

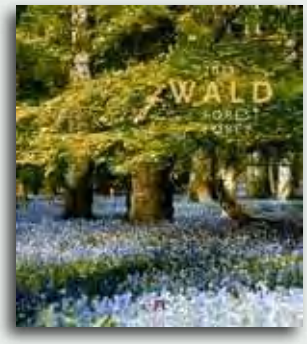
Entdecken Sie die Welt der Pflanzen, Insekten und Bakterien aus nächster Nähe. Die mehrfach ausgezeichneten Wissenschaftsfotografen Oliver Meckes und Nicole Ottawa führen Sie in die Welt des Raster-Elektronenmikroskops. Wissenschaftliche Fotografien, abgerundet durch sachkundige und informative Texte.

STARKE TYPEN – WELT DER TIERE

Text dtsch.-engl.-französ., 13 farb. Blätter, Format: 60 x 50 cm, Palazzi-Verlag

Bestell-Nr. 3362
€ 39,80

Wie viel Kraft und Lebensfreude, wie viel Charme und Witz diese Bilder vermitteln! 12 Glanzlichter der Tier-Fotografie als idealer Begleiter durch das Jahr.



WALD

14 farb. Blätter, Format: 48 x 54 cm, Ackermann

Bestell-Nr. 3674 **€ 29,95**

Ob mystischer Urwald oder herbstliche Baumkronen in voller Farbenpracht – in den Bildern dieses Kalenders offenbart sich die Vielfalt des Ökosystems Wald in seiner ganzen Pracht.

Weitere Kalender finden Sie unter:
www.science-shop.de/kalender

VOM ZAUBER ALTER BÄUME

Kalendarium dreisprachig, 13 kolorierte SW-Blätter, Format: 58,4 x 48,5 cm, DuMont

Bestell-Nr. 3361 **€ 26,99**

Zwölf verwitterte und steinalte Baumriesen präsentieren sich in ihrer ganzen Ehrwürdigkeit und Imposanz. Heinz Wohner hat sie in Deutschland aufgespürt, fotografiert, und anschließend die SW-Fotografien kunstvoll von Hand koloriert.

EULEN

Kalendarium dtsch.-engl.-französ., 13 farb. Blätter, Format: 45 x 34,5 cm, Weingarten

Bestell-Nr. 2185 **€ 19,95**

Diese scheuen Nachtvögel gehören von Anbeginn zum Kreis der Geschöpfe, die den Menschen von besonderer Bedeutung waren, ob als Symbol für Weisheit (bei den alten Griechen) oder Tod und Verderben (bei den Christen).

EINSTEIN FÜR QUANTEN-DILETTANTEN

Ein vergnüglicher Crashkurs in Sachen Naturwissenschaften

320 zweifarb. Bl., 12,5 x 16 cm, Harenberg

Bestell-Nr. 3093 **€ 15,99**

Täglich spannende Erklärungen aus Biologie, Physik, Chemie usw. Verblüffend leicht verständlich!

SIMPLIFY YOUR DAY

Einfacher und glücklicher leben

320 Bl. m. Cartoons, 12,5 x 16 cm, Campus

Bestell-Nr. 2174 **€ 12,99**

Schluß mit der Kompliziertheit des Lebens. Die Fülle praktischer und sofort umsetzbarer Tipps sowie die liebevollen Zeichnungen von Werner Tiki Küstenmacher sorgen für die tägliche Leichtigkeit des Seins.

Bequem bestellen:

- **direkt bei** www.science-shop.de
- **per E-Mail** info@science-shop.de
- **telefonisch** +49 6221 9126-841
- **per Fax** +49 711 7252-366
- **per Post** Postfach 810680 • 70523 Stuttgart

Für Bestellungen außerhalb Deutschlands und Österreichs berechnen wir € 3,50 Versandkosten. Alle Preise inkl. Umsatzsteuer. Preise unter Vorbehalt. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH

Geschenkideen – für die Forscher von morgen

Science-Shop.de

Robert Winston

COOLE EXPERIMENTE FÜR ZU HAUSE

2012, 144 S. m. 350 Farbabb. u. Zeichn., geb., ab 8 Jahren, Dorling Kindersley

Bestell-Nr. 3626

€ 14,95 (D), € 15,40 (A)

Leuchtende Götterspeise, »Elefantenzahnpasta«, ein Vulkanausbruch in der Küche – dieses Buch steckt voller faszinierender Versuche, die sich leicht zu Hause umsetzen lassen. Mit Kurzporträts großer Wissenschaftler – die ideale Ergänzung zum Schulunterricht!

DAS GRÖSSTE ORIGAMI-BUCH ALLER ZEITEN

12 extragroße Faltblätter inklusive 2012, 24 S. m. zahlr. Farbabb., kart., Frech

Bestell-Nr. 3746

€ 9,99

Buch aufklappen und loslegen: Alle Faltmodelle sind Schritt für Schritt erklärt und illustriert. Plus: 12 gemusterte Faltblätter zum Heraustrennen und sofort Losfalten.

Jürgen Brater

WAS MACHT DER U-BAHN-FAHRER, WENN ER AUF TOILETTE MUSS?

66 blitzgescheite Fragen rund um Alltag, Menschen und Tiere

2012, 159 S. m. zahlr. Farbfotos., ab 10 Jahren, geb., Beltz

Bestell-Nr. 3741 **€ 14,95 (D),** € 15,40 (A)

Was macht der U-Bahn-Fahrer, wenn er auf Toilette muss? Vergiftet sich die Kobra, wenn sie auf ihre Zunge beißt? Wie heißt Barbie mit Nachnamen? Ob Naturwissenschaften, Alltag, Redewendungen oder Comics – Jürgen Brater hat sich unter Kindern umgehört und die interessantesten Fragen gesammelt, um sie verständlich, unterhaltsam und fundiert zu beantworten.

Carmen Skupin

ABENTEUER ELEKTRONIK

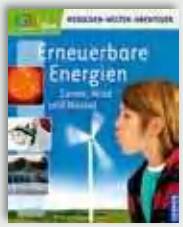
2012, Set aus Bauteilen und Buch, 24 S. m. zahlr. farb. Abb., ab 8 Jahren, Franzis

Bestell-Nr. 3742

€ 29,95 (D), € 29,95 (A)

Ob drinnen oder draußen, bei Tag oder Nacht, in diesem Set aus Buch und Bauteilen finden Kinder ab 8 Jahren immer das richtige Elektronikabenteuer.

Das Einzigartige an diesem Bastelbuch: alle elektrischen Teile sind bereits enthalten und die restlichen Materialien lassen sich in jedem Haushalt finden. Carmen Skupin will mit diesem Experimentierbuch Mädchen und Jungen für Elektronik begeistern.



Felix Homann

ERNEUERBARE ENERGIEN

Sonne, Wind und Wasser

1. Aufl. 2012, 64 S. m. zahlr. Farbabb., ab 9 Jahren, geb., Kosmos

Bestell-Nr. 3736

€ 12,95 (D), € 13,40 (A)

Woher kommt in Zukunft unser Strom? Eine viel diskutierte Frage und Ausgangspunkt für zahlreiche neue Entwicklungen. Schließlich brauchen wir Energiequellen, die umweltfreundlich und unendlich nutzbar sind, und neue Technologien, die uns ermöglichen, daraus Strom zu gewinnen.

SPIONE

Agenten, Codes und Überwachung

2012, 192 S., über 1000 Farbfotografien, Zeichnungen und Grafiken, ab 10 Jahren, geb., Dorling Kindersley

Bestell-Nr. 3739

€ 16,95 (D), € 17,50 (A)

Woran erkennt man einen Spion? Wie knackt man verschlüsselte Nachrichten? Welche besonderen Fähigkeiten braucht man als Agent und welche Tricks gibt es? Dieses Buch enthüllt alles über Top-Spione und deckt ihre verborgenen Überwachungsmethoden auf.

SMARTPHONES, GAMES & INTERNET

So spannend ist die digitale Welt

2012, 144 S., über 500 Farbfotografien und Grafiken., ab 10 Jahren, geb., Dorling Kindersley

Bestell-Nr. 3738

€ 16,95 (D), € 17,50 (A)

Eine Einführung in die Welt des Internets, der Computer, Videospiele, Hightech-Geräte und Roboter.

Auf spannende Weise erfahren Kinder mehr über die Entwicklung, Vielfalt und technischen Details moderner Hightech-Geräte. Porträts bekannter Erfinder, interessante Grafiken und Teilansichten elektronischer Geräte vermitteln das Wissen einfach und leicht verständlich.

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich

KALENDER FÜR CLEVERE KIDS

Der Kinder Brockhaus

320 zweifarb. Bl., 12,5 x 16 cm, ab 8 Jahren, Brockhaus

Bestell-Nr. 1309 **€ 10,99**

Der tägliche Kick für schlaue Kinder: Spannende Fakten, atemberaubende Rekorde und witzige Anekdoten, Rezepte und Experimente, knifflige Rätsel, exotische Tiere, vom WWF vorgestellt.

WISSEN FÜR KIDS

320 vierfarb. Bl., 12,5 x 16 cm, ab 10 Jahren, Harenberg

Bestell-Nr. 2870 **€ 12,99**

Eine spannende Entdeckungsreise durch die Welt des Wissens. Farbenfrohes, kindgerechtes Layout.

Besuchen Sie uns im Internet unter:
www.science-shop.de

BESTELLCOUPON

Gleich bestellen! Einfach Bestellcoupon kopieren und faxen an: 0711/7252-366 oder ausschneiden und per Post schicken: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH • Science-Shop • Postfach 810680 D-70523 Stuttgart. Schicken Sie eine E-Mail an: info@science-shop.de oder rufen Sie an unter: 06221/9126-841.

JA, ich bestelle und habe 14 Tage volles Rückgaberecht

Anzahl	Bestell-Nr.	Titel	€

Besteller-Anschrift:

Name/Vorname

Straße/Hausnummer

Datum/Unterschrift

E-Mail-Adresse

☐ **Zahlung per Bankeinzug**

Geldinstitut/Ort

Konto-Nr.

BLZ

Datum/Unterschrift

☐ **Zahlung per Rechnung**

PLZ/Wohnort

Kunden-Nr. (falls vorhanden)

XMAS12SDW

Für Bestellungen außerhalb Deutschlands und Österreichs berechnen wir € 3,50 Versandkosten. Alle Preise inkl. Umsatzsteuer. Preise unter Vorbehalt. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH

Warum wir in der Sauna überleben

Schweiß kühlt. Doch genau dann, wenn er uns in der Sauna in wahren Sturzbächen am Körper herabströmt, erhitzt sich in Wahrheit der Körper.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

> Denn es wäre ein Fluidum möglich, das alle hinzudringende Wärme durch Verdampfung verlöre.
>
> *Georg Christoph Lichtenberg (1742–1799)*

100 Grad Celsius – das ist keine Wohlfühltemperatur. Nicht einmal den kleinen Finger würden wir in kochendes Wasser stecken. Und doch: In der Sauna halten wir es bei 100 Grad eine Viertelstunde lang recht gut aus. Rohen Eiern erginge es bei diesen Lufttemperaturen ganz anders: Sie würden bald hart gekocht, auch wenn es länger dauert als gewohnt. Sogar ein Steak ließe sich, allerdings mit zweifelhaftem geschmacklichem Ergebnis, in der Sauna garen. Ein saunierender Mensch übersteht die Hitze hingegen unbeschadet. Warum?

Für Spekulationen, denen zufolge kochendes Wasser und 100 Grad heiße Saunaluft auf mysteriöse Weise vielleicht doch unterschiedlich heiß sein könnten, gibt es keinerlei Grund. 100 Grad sind 100 Grad, ob im Wasser oder in der Luft. Die thermische Wirkung eines Mediums auf einen Organismus hängt eben nicht nur von seiner Temperatur ab. Die weiß glühenden Eisenteilchen, die beim Schleifen eines Meißels auf die bloße Hand prasseln, sind über 1000 Grad heiß. Auf der Haut rufen sie jedoch nur leichtes Prickeln hervor, weil ihre innere Energie wegen ihrer geringen Masse so gering ist, dass sie nicht viel Wärme abgeben können.

DREAMSTIME / ANNI ARPONEN

Für eine typische finnische Sauna, die auch durchaus mal mitten in der Landschaft stehen kann, sind Lufttemperaturen um 100 Grad Celsius nicht ungewöhnlich.

Entscheidend für die Schädigung eines Organismus ist der Energiestrom, also die pro Zeiteinheit aufgenommene Energiemenge. Er ist umso größer, je stärker sich die Temperatur zwischen heißem Medium und Organismus unterscheidet. Wie viel Energie aber tatsächlich in Letzteren strömt, hängt neben dem jeweiligen Konvektionsverhalten von Luft und Wasser vor allem von der Wärmeleitung sowie vom Energiespeichervermögen des Mediums ab, also von seiner Wärmekapazität.

Wasser und Luft unterscheiden sich hier deutlich. Luft leitet Wärmeenergie nur sehr schlecht (weshalb sie einer der besten thermischen Isolatoren ist). Zudem kann sie nur wenig Wärmeenergie speichern: Um ein bestimmtes Volumen an Wasser um ein Grad Celsius zu erwärmen, braucht man etwa 3000-mal so viel Energie wie für dasselbe Volumen an Luft. Beide Faktoren zusammen führen dazu, dass unser Körper in einer 100 Grad heißen Sauna viel weniger Energie aufnimmt als ein Körperteil, das versehentlich in kochendes Wasser gerät.

Doch auch in der Sauna ist nicht alles heiße Luft. Das gläserne Thermometer und erst recht das Metallgehäuse des Feuchtigkeitsmessers sollte man tunlichst nicht berühren. Selbst der direkte Kontakt mit Holzbänken und -wänden kann anfangs ganz schön unangenehm sein. Ein flauschiges Handtuch hingegen, auf dem man sitzt, isoliert durch die in seinen Gewebeporen eingeschlossenen Luftbläschen gegen die Hitze.

Was die heiße Luft nicht sofort schafft, erreicht sie aber doch mit der Zeit. So wie die rohen Eier allmählich gekocht werden, empfindet auch unser Körper den Aufenthalt in der Sauna bald als unerträglich. Bei Lufttemperaturen um 100 Grad, wie sie für die so genannte finnische Sauna typisch sind, räumen die meisten Menschen nach 15 bis 20 Minuten unweigerlich das Feld.

Dass wir es überhaupt so lange aushalten, verdanken wir dem Schwitzen. Durch feine Poren der Haut sondern wir Schweiß ab, ein zu 99 Prozent aus Wasser bestehendes Sekret. Anschließend verdampfen oder verdunsten die Schweißtröpfchen auf der Haut. Die dafür benötigte Energie entziehen sie dem Körper und kühlen ihn dadurch. (Von Verdunsten spricht man, wenn die Verdampfung bei einer niedrigeren als der Siedetemperatur erfolgt.)

Zusätzlichen Schutz bietet eine isolierende Luftschicht von wenigen Millimetern Dicke, die von Poren und Härchen des Körpers gewissermaßen festgehalten wird. Auch wenn sie unsichtbar bleibt, lässt sich ihre Existenz leicht testen. Denn spätestens, wenn man sich Luft zuwedelt, wird diese Isolier-

ISTOCKPHOTO / MICHAEL KEMTER

Verdunstende Schweißtröpfchen entziehen der Haut Wärme. Die Kühlwirkung endet, wenn die Luft wassergesättigt ist.

schicht durch äußere Luftströmungen lokal aufgebrochen. Dann fühlt man sofort, wie der Körper in direkten Kontakt mit der heißen Luft gerät und der in den Körper fließende Energiestrom ansteigt.

Die Energie fließt in den Dampf

Entscheidend für die Kühlwirkung des Schweißes sind die großen Energiemengen, die beim Übergang vom flüssigen in den gasförmigen Zustand im Spiel sind. Die Verhältnisse beim Sieden von Wasser führen das vor Augen. Auch wenn eine Herdplatte mit aller Kraft heizt, beträgt die Temperatur von kochendem Wasser konstant 100 Grad. Denn der Energiestrom lässt jetzt nicht mehr die Temperatur steigen, sondern dient ausschließlich der Verdampfung. Dass die Menge des flüssigen Wassers dennoch nur sehr langsam abnimmt, bedeutet nichts anderes, als dass die Energie, die es zum Verdampfen benötigt, eben sehr groß ist. Bei einer Hauttemperatur von rund 40 Grad Celsius bedarf es zum Verdunsten sogar noch ein wenig mehr Energie. So erklärt sich, warum auch die eher geringen Schweißmengen auf unserem Körper sehr viel Energie aufnehmen können und so zumindest eine Zeit lang verhindern, dass die Körpertemperatur steigt.

Andererseits ist gerade ein schweißtriefender Körper kein Zeichen für effektives Schwitzen. In solchen Fällen ist die relative Luftfeuchte zu hoch, als dass der Schweiß überhaupt verdampfen könnte. Indem man die Temperatur erhöht, steigert man die maximal mögliche Luftfeuchte. Angenommen, in einer Sauna herrscht anfangs bei einer relativen Luftfeuchte von 100 Prozent eine Temperatur von 20 Grad. Wenn wir die Temperatur auf 100 Grad erhöhen, sinkt die Luftfeuchte auf gerade noch drei Prozent. In derart trockener Luft verdunstet der Schweiß im Nu, mit entsprechender Kühlwirkung. So kann man es schon einige Zeit aushalten.

Jeder Aufguss verändert die Situation aber völlig. Die durch das Schwitzen gekühlte Haut nimmt in einer finnischen Sauna eine Temperatur von typischerweise etwa 43 Grad an. (Damit ist sie übrigens der kühlste Ort im Raum, deutlich kühler noch als die Wände und die Scheibe in der Saunatür!) Trifft nun Wasser auf die heißen Steine des Saunaofens, entsteht sehr schnell sehr viel Wasserdampf, der die Luftfeuchte auf einen Schlag erhöht.

Die meisten Menschen sehen diesen Augenblick, in dem sie eine bis ans Unerträgliche reichende Hitze spüren und der Körper regelrecht vor Wasser trieft, als Zeichen für höchste Temperatur und für Rekordwerte beim Schwitzen. Tatsächlich tritt der gegenteilige Effekt ein. Weil die Luftfeuchte nun maximal ist, kommt das Schwitzen sogar zum Stillstand. Mehr noch: Der Dampf in der Luft kühlt an der Haut so stark ab, dass er kondensiert; der Mensch beschlägt wie eine kalte Fensterscheibe. Die Kondensationswärme wird dabei direkt auf der Haut frei und geht unmittelbar auf den Körper über. Der Prozess, bei dem Wärmeenergie durch verdampfenden Schweiß »unschädlich« gemacht wird, kehrt sich also letztlich um.

Hinzu kommt die Wärmeübertragung durch die heiße Luft. Sie ist intensiver als zuvor, denn der über dem Saunaofen turbulent aufsteigende Wasserdampf hat die Luft in Aufruhr gebracht. Dadurch zerstört er auch die den Körper umgebende Isolierschicht, so dass heiße Luft und heißer Wasserdampf jetzt unmittelbar auf die Haut gelangen.

Mit dem Aufguss endet also in Wahrheit das Schwitzen – aber die Hitze beginnt.

DER AUTOR

H. Joachim Schlichting war bis 2011 Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. 2008 erhielt er für seine didaktischen Konzepte den Pohl-Preis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.

QUELLE

Vesala, T.: Phase Transitions in Finnish Sauna. In: Kulmala, M., Wagner, P.E. (Hg.): Nucleation and Atmospheric Aerosols. Proceedings of the 14th International Conference on Nucleation and Atmospheric Aerosols, S. 403–406, Pergamon 1996

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1165736

Menschliche Gemeinschaften sind auf die möglichst reibungslose Zusammenarbeit vieler Individuen angewiesen.

ISTOCKPHOTO / MATT JEACOCK

KOOPERATION

Warum sind wir hilfsbereit?

Die biologische Evolution wird keineswegs nur durch Konkurrenz und Egoismus vorangetrieben. Als ebenso wichtig im Kampf ums Dasein erweist sich die Kooperation der Individuen.

Von Martin A. Nowak

Nachdem im März 2011 mehrere Reaktorblöcke des japanischen Atomkraftwerks Fukushima Daiichi nach einem schweren Erdbeben und einer Tsunami-Flutwelle durch katastrophale Kernschmelze zerstört worden waren, erklärte sich ein junger Arbeiter freiwillig bereit, in die havarierte Anlage zurückzukehren und mitzuhelfen, die Lage unter Kontrolle zu bringen. Wie er wusste, herrschten im Innern so hohe Strahlungswerte, dass er wohl niemals gesunde Kinder würde zeugen können. Dennoch drang er durch die Tore von Fukushima in die strahlenverseuchte Luft vor und machte sich ans Werk, ohne dafür mehr als den normalen bescheidenen Arbeitslohn zu erwarten. »Es gibt nur wenige unter uns, die diese Aufgabe erledigen können«, erklärte der Arbeiter, der anonym bleiben wollte, im Juli 2011 der britischen Zeitung »The Independent«. »Ich bin jung und unverheiratet, und ich halte es für meine Pflicht, dieses Problem zu lösen.«

Das mag wie ein rarer Fall von beispielhaftem Heldentum anmuten, doch die Natur kennt viele Beispiele für selbstloses Verhalten. Die Zellen im Organismus stimmen sich ab, um ihre Teilung zu begrenzen und so die Entstehung von Krebs zu vermeiden; viele Arbeiterameisen opfern ihre Fruchtbarkeit, um ihrer Königin und der Kolonie zu dienen; Löwinnen säugen andere Jungen innerhalb des Rudels. Wir Menschen helfen einander in besonders vielfältiger Weise – von der Nahrungs- und Partnersuche bis zur Verteidigung des Territoriums. Selbst wenn die Helfer nicht unbedingt gleich ihr Leben aufs Spiel setzen, riskieren sie doch eine Verringerung des eigenen Reproduktionserfolgs zu Gunsten eines anderen Individuums.

Jahrzehntelang haben sich Biologen über das Phänomen Kooperation den Kopf zerbrochen und verzweifelt versucht, es mit der vorherrschenden Deutung der Evolution als Kampfs aller gegen alle zu vereinbaren. Als Charles Darwin die Evolution durch natürliche Zuchtwahl erklärte – wonach sich Individuen mit vorteilhaften Eigenschaften öfter fortpflanzen als ihre Artgenossen und deshalb mehr zur nächsten Generation beitragen –, nannte er diesen Wettstreit den »Kampf ums Dasein« (struggle for life). Wenn man diesen Ausdruck wörtlich nimmt und als Handlungsnorm auf die Spitze treibt, führt das rasch zu dem Schluss, man solle niemals einem Rivalen helfen, sondern hemmungslos lügen und betrügen, um voranzukommen. Um im Spiel des Lebens zu gewinnen, wäre jedes Mittel recht.

Aber warum ist selbstloses Verhalten dann so allgegenwärtig? In den vergangenen zwei Jahrzehnten habe ich dieses scheinbare Paradoxon mit den Mitteln der Spieltheorie untersucht. Das Ergebnis: Kooperation und Konkurrenz sind keine Gegensätze, sondern haben von Anfang an die Evolution des Lebens auf der Erde geprägt – von den ersten Zellen bis zum *Homo sapiens*. Dahinter steckt nicht nur der rücksichtslose Kampf ums Überleben, sondern ebenso auch die Anpassung an die von Artgenossen geprägten Lebensumstände. Und nirgends macht sich der evolutionäre Einfluss der Kooperation stärker bemerkbar als bei uns Menschen. Meine Resultate unterstreichen, dass gegenseitige Hilfe nicht nur in der Vergangenheit der Schlüssel zu unserem Erfolg war, sondern auch über unsere Zukunft entscheidet.

Gegner oder Partner?

Für das Thema begann ich mich 1987 zu interessieren, als ich an der Universität Wien Mathematik und Biologie studierte. Bei einer Alpenwanderung mit Kollegen und Professoren erfuhr ich von einem als Gefangenendilemma bekannten Paradoxon der Spieltheorie, das sehr schön illustriert, warum Kooperation die Evolutionsbiologen so verwirrt. Das Dilemma lautet folgendermaßen: Angenommen, zwei Personen

AUF EINEN BLICK

GROSSMUT UNTER EGOISTEN

1 Nach gängiger Meinung herrscht in der Natur ein gnadenloser Kampf um Leben und Tod. Doch tatsächlich ist auch **Kooperation** eine treibende Kraft der Evolution.

2 Es gibt **fünf Mechanismen**, durch die Kooperation in und zwischen verschiedenen Organismen entsteht – von Bakterien bis zu Menschen.

3 Insbesondere der Mechanismus der **indirekten Reziprozität** macht uns Menschen hilfsbereit. Er beruht auf Reputation: Wer sich einen guten Ruf als Altruist erwirbt, dem wird umgekehrt auch bevorzugt geholfen.

wurden festgenommen und erwarten Gefängnisstrafen, weil sie gemeinsam ein Verbrechen begangen haben. Der Staatsanwalt vernimmt sie getrennt und schlägt jedem einen Deal vor. Wenn der eine den anderen verrät, während dieser dichthält, bekommt der Belastungszeuge nur ein Jahr aufgebrummt, während der verstockte Mittäter satte vier Jahre Gefängnis einfährt. Wenn beide zusammenhalten und einander nicht verpfeifen, kommen beide mit je zwei Jahren davon. Doch wenn beide sich gegenseitig belasten, werden sie zu je drei Jahren verurteilt.

Da jeder Gefangene separat vernommen wird, weiß keiner der beiden, ob sein Partner ihn verraten oder decken wird. Wenn man die möglichen Ergebnisse auf einer Auszahlungsmatrix einträgt (siehe Kasten auf gegenüberliegender Seite), erkennt man, dass es vom Standpunkt des Einzelnen aus am besten ist, nicht zu kooperieren, sondern den Partner anzuschwärzen. Doch sofern beide Parteien derselben Überlegung folgen und Verrat üben, erzielen sie nur das drittbeste Ergebnis – je drei Jahre Haft – an Stelle der zwei Jahre, die sie bekämen, wenn sie miteinander kooperierten.

Das Gefangenendilemma faszinierte mich sofort, da sich an diesem Modell die Beziehung zwischen Konflikt und Kooperation erforschen ließ. Mein Doktorvater Karl Sigmund und ich entwickelten schließlich Computersimulationen des Dilemmas für große Gemeinschaften von »Gefangenen«. An ihnen konnten wir beobachten, wie sich die individuellen Strategien in diesen Gemeinschaften von Verrat zu Kooperation und zurück zu Verrat entwickelten, wobei sie Zyklen von Wachstum und Abnahme durchliefen. Mit Hilfe der Simulationen entdeckten wir schließlich einen Mechanismus, der die Vorliebe der natürlichen Selektion für selbstsüchtiges Verhalten zu überwinden vermag und mögliche Verräter zur Hilfsbereitschaft bekehrt.

Wie du mir, so ich dir

Wir begannen mit einer Zufallsverteilung von Abtrünnigen und Kooperatoren. Nach jeder Spielrunde setzten die Gewinner Nachkommen in die Welt, die an der nächsten Runde teilnahmen. Die Nachkommen behielten größtenteils die Strategie ihrer Eltern bei – bis auf gelegentliche Zufallsmutationen, welche die individuelle Strategie veränderten. Im Lauf der Simulation beobachteten wir schon nach wenigen Generationen, dass in jeder Spielrunde sämtliche Individuen abtrünnig wurden. Doch nach einiger Zeit tauchte plötzlich eine neue Strategie auf: Manche Spieler begannen zusammenzuarbeiten und kopierten von da an Zug um Zug ihren Gegenspieler – nach der Devise »Wie du mir, so ich dir« (tit for tat). Der Strategiewechsel führte rasch zu Gemeinschaften, in denen Kooperation dominierte.

Diese Entwicklung von Kooperation zwischen Individuen, die einander wiederholt begegnen, beruht auf so genannter direkter Reziprozität. Vampirfledermäuse bieten ein gutes Beispiel dafür. Falls eine Fledermaus eines Nachts keine Gelegenheit hatte, sich direkt an lebender Beute gütlich zu tun, bettelt sie ihre satten Artgenossen im Schlafplatz an. Wenn

sie Glück hat, wird ein Mitbewohner seine Blutmahlzeit mit ihr teilen, indem er etwas davon ins Maul des hungrigen Tiers erbricht. Da Vampire in stabilen Gruppen leben und jeden Tag nach der Jagd zum Schlafplatz zurückkehren, begegnen sich die Gruppenmitglieder andauernd wieder. Beobachtungen zufolge merken sich die Fledermäuse, wer ihnen in Zeiten der Not aushalf, und wenn eines Tages der großzügige Artgenosse Hunger leidet, revanchiert sich vorzugsweise das Tier, dem er einst beigestanden hat, für die damalige Wohltat.

Besonders interessant an unseren ersten Computersimulationen war die Erkenntnis, dass es mehrere Arten von direkter Reziprozität gibt. Innerhalb von 20 Generationen wurde die anfängliche Tit-for-tat-Strategie von einer großzügigeren abgelöst, bei der die Spieler mitunter auch dann weiter kooperierten, wenn ihr Rivale sie verraten hatte. Wir wurden praktisch Zeuge der Evolution von Nachsicht – einer direktreziproken Strategie, bei der die Spieler einen gelegentlichen Fehler verzeihen.

Außer der direkten Reziprozität identifizierte ich später noch vier andere Mechanismen für die Evolution von Kooperation. Alle in den tausenden Fachartikeln, die Wissenschaftler zu dem Thema schon publiziert haben, beschriebenen Szenarien fallen unter eine oder mehrere dieser fünf Kategorien.

Auf eine zweite Art kann Kooperation in einer Population Fuß fassen, wenn Kooperatoren und Abtrünnige nicht gleichförmig verteilt sind; man spricht dann von räumlicher Selektion. Da Nachbarn – oder Freunde in einem sozialen Netzwerk – einander bevorzugt helfen werden, bilden lokal gehäufte Kooperatoren in einer Population bald wachsende Cluster, die sich im Wettbewerb mit Abtrünnigen behaupten können. Räumliche Selektion funktioniert schon bei einfachen Organismen. Kooperierende Hefezellen erzeugen unter individuellem Aufwand ein Enzym, das zum Verdauen von Zucker dient. Abtrünnige Konkurrenten schmarotzen an den Enzymen der Kooperatoren, statt selbst welche zu produzieren. Wie Jeff Gore vom Massachusetts Institute of Technology und unabhängig davon Andrew Murray von der Harvard University herausgefunden haben, dominieren in gut durchmischten Hefekulturen die Abtrünnigen. Hingegen setzen

sich in inhomogenen Populationen mit Klumpen von Kooperatoren und Schmarotzern die uneigennützigen Enzymproduzenten durch.

Ein unmittelbar einsichtiger weiterer Mechanismus für die Evolution von Selbstlosigkeit ist die Kooperation zwischen genetisch verwandten Individuen, die so genannte Verwandtenselektion. Individuen bringen Opfer für ihre Verwandten, weil sie gemeinsame Gene tragen. Zwar mindert jemand, der einem Verwandten in Not beisteht, vielleicht die eigene reproduktive Fitness, doch dafür fördert er die Verbreitung der Gene, die Helfer und Hilfsempfänger gemeinsam haben. Der britische Biologe J. B. S. Haldane (1892–1964), der erstmals von Verwandtenselektion sprach, fasste die Idee in die Worte: »Ich werde in den Fluss springen, um zwei Brüder oder acht Cousins zu retten.« Damit meinte er die Tatsache, dass unsere Geschwister 50 Prozent unserer DNA mit uns teilen, unsere Cousins ersten Grades 12,5 Prozent. Allerdings lassen sich die Fitnesseffekte der Verwandtenselektion nicht so einfach berechnen, wie viele Forscher dachten. Meine Kollegen und ich haben kürzlich eine lebhafte Debatte über die der Theorie zu Grunde liegende Mathematik ausgelöst. Wir kommen zu dem Schluss, dass in vielen Fällen von vermeintlicher Verwandtenselektion in der Tat Gruppenselektion – siehe weiter unten – vorliegt.

Der vierte Mechanismus, der das Entstehen von Kooperation fördert, ist die indirekte Reziprozität; sie unterscheidet sich grundlegend von der direkten Variante, die Sigmund und ich ursprünglich untersuchten. Bei der indirekten Reziprozität hilft ein Individuum dem anderen, um die eigene Reputation zu steigern. Wer den Ruf genießt, andere zu unterstützen, wenn sie in Not geraten, wird selbst eher in den Genuss fremder Hilfe kommen, falls ihn einmal sein Glück verlässt. Nach der engen Tit-for-tat-Strategie würde jeder auf dem Standpunkt stehen: Ich kraule deinen Rücken nur, wenn du meinen kraulst. Jetzt aber lautet die Devise: Ich kraule dir den Rücken, und irgendwer wird dann schon meinen kraulen. Beispielsweise verbessern Japanmakaken, die hochrangige und mit guter Reputation ausgestattete Gruppenmitglieder putzen, die eigene Reputation – und empfangen mehr Putzzuwendung – einfach dadurch, dass sie einträchtig zusammen mit dem Alphatier gesehen werden.

Einer für alle …

Schließlich können Individuen selbstlose Akte zu Gunsten der ganzen Gruppe vollziehen. Dieser fünfte Weg zur Kooperation heißt Gruppenselektion. Schon Charles Darwin zog diesen Mechanismus in Betracht, als er 1871 in seinem Buch »Die Abstammung des Menschen und die geschlechtliche Zuchtwahl« argumentierte: »Ein Stamm, welcher viele Glieder umfasst, die … stets bereit sind, einander zu helfen und sich für das allgemeine Beste zu opfern, wird über die meisten anderen Stämme den Sieg davontragen, und dies würde natürliche Zuchtwahl sein.« Seither streiten die Biologen heftig darüber, ob die natürliche Selektion Kooperation zu fördern vermag, um die Reproduktionschancen der ganzen Gruppe zu verbessern. Doch wie mathematische Modelle von mir und anderen Forschern zeigen, kann die Selektion auf mehreren Ebenen wirken – von einzelnen Genen über Gruppen verwandter Individuen bis zu ganzen Spezies. So konkurrieren die Angestellten einer Firma zwar miteinander, um auf der Karriereleiter aufzusteigen, aber sie kooperieren auch, damit ihr Unternehmen im Wettbewerb mit anderen Firmen Erfolg hat.

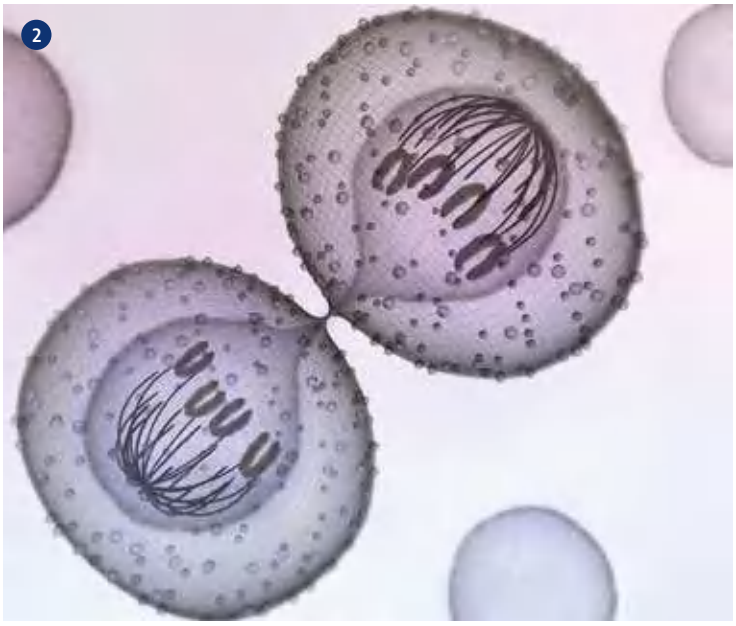
Die fünf Mechanismen der Kooperation gelten für alle Arten von Organismen, von Amöben bis zu Zebras – und in manchen Fällen sogar für Gene und andere Zellbausteine. Diese Allgemeingültigkeit lässt vermuten, dass Kooperation von Anfang an eine treibende Kraft für die Evolution des Lebens auf der Erde gewesen ist. Vor allem in einem Fall erwies sich diese Kraft als besonders wirksam: Binnen einiger Millionen Jahren verwandelte sich ein langsamer, wehrloser Affe in die einflussreichste Kreatur des Planeten. Diese Spezies erfand ein verblüffendes Arsenal von Technologien, mit denen sie die Tiefen der Meere auslotet, den Weltraum erforscht und ihre Errungenschaften blitzschnell aller Welt mitteilt. Solch enorme Leistungen haben wir durch Zusammenarbeit geschafft. In der Tat: Menschen sind die kooperativste Spezies überhaupt.

Natürliche Tendenz zum Verrat

Ein spieltheoretisches Paradoxon verdeutlicht, warum Kooperation in der Natur eigentlich die Ausnahme sein müsste. Beim Gefangenendilemma stehen zwei Personen vor der Verurteilung für ein gemeinsam begangenes Verbrechen. Das Strafmaß hängt davon ab, ob sie miteinander kooperieren, das heißt die Aussage verweigern, oder ihren Mittäter verraten, indem sie ein Geständnis ablegen (siehe Tabelle unten). Da keiner der beiden weiß, was der andere tun wird, ist es für jeden die rationale Entscheidung, den anderen zu verraten – obwohl die beiden durch Kooperation, das heißt Dichthalten, besser wegkämen, als wenn beide plaudern.

		INDIVIDUUM 2: KOOPERIERT (schweigt)	INDIVIDUUM 2: VERRÄT (gesteht)
INDIVIDUUM 1	KOOPERIERT (schweigt)	2 Jahre Gefängnis 2 Jahre Gefängnis	4 Jahre Gefängnis 1 Jahr Gefängnis
INDIVIDUUM 1	VERRÄT (gesteht)	1 Jahr Gefängnis 4 Jahre Gefängnis	3 Jahre Gefängnis 3 Jahre Gefängnis

GETTY IMAGES / TIM FLACH



GETTY IMAGES / MEDICALRF.COM

Blattschneiderameisen arbeiten zusammen, um Blattstücke in ihren Bau zu schleppen (1). Zellen regulieren ihre Teilung und vermeiden dadurch die Entstehung von Krebs (2). Löwinnen ziehen gemeinsam den Nachwuchs auf (3). Wenn Japanmakaken einander öffentlich putzen, verbessern sie ihre Reputation in der Gruppe (4).

Doch wenn die fünf Mechanismen der Kooperation überall in der Natur auftreten, erhebt sich die Frage: Was macht gerade Menschen so besonders hilfsbereit? Meinem Eindruck nach bietet der Mensch mehr als jedes andere Lebewesen anderen seine Unterstützung auf Grund indirekter Reziprozität oder Reputation an. Und warum? Weil nur Menschen über echte Sprache – sowie Namen füreinander – verfügen; damit können wir Informationen über jedermann austauschen, von Familienangehörigen bis zu völlig Fremden auf der anderen Seite des Globus. Wir sind geradezu besessen davon, wer mit wem was warum tut, um uns selbst im uns umgebenden sozialen Netzwerk optimal zu positionieren. Untersuchungen zufolge haben die Menschen bei fast allen Entscheidungen – wofür sollen wir Geld spenden, welche neu gegründete Firma wollen wir finanziell unterstützen? – den Gesichtspunkt der Reputation im Auge. Meine Kollegin Rebecca Henderson an der Harvard University, Expertin für Konkurrenz in der Geschäftswelt, fand heraus, dass Toyota in den 1980er Jahren vor allem durch seine Reputation, die Zulieferer fair zu behandeln, Wettbewerbsvorteile gegenüber anderen Autoherstellern erzielte.

Erst das Zusammenwirken von Sprache und indirekter Reziprozität ermöglicht die schnelle kulturelle Evolution, die für unsere Anpassungsfähigkeit als Art entscheidend ist. Angesichts von Bevölkerungswachstum und Klimawandel werden wir diese Flexibilität in Zukunft dringend brauchen. Allerdings stehen unsere Chancen hier nicht besonders gut, wenn wir unsere bisherigen Leistungen im Umweltschutz betrachten. Auch dazu liefert die Spieltheorie Erkenntnisse. Bestimmte soziale Dilemmata, an denen mehr als zwei Spieler beteiligt sind, heißen Öffentliche-Güter-Spiele. Dabei profitiert jeder in der Gruppe von meiner Kooperation, aber unter sonst gleichen Bedingungen erhöhe ich meinen Gewinn, wenn ich von Kooperation zu Selbstsucht übergehe. Das heißt: Obwohl ich möchte, dass die anderen kooperieren, verhalte ich mich »schlau«, wenn ich sie hintergehe. Das Problem ist, dass jeder in der Gruppe genauso denkt, wodurch anfängliche Kooperation unweigerlich in allgemeiner Abtrünnigkeit endet.

… alle für einen

Im klassischen Öffentliche-Güter-Szenario, das der amerikanische Ökologe Garrett Hardin (1919–2003) im Jahr 1968 als die »Tragik der Allmende« beschrieben hat, erlaubt eine Gruppe von Viehzüchtern ihren Herden, das gemeinsam genutzte Weideland zu überweiden, obwohl sie wissen, dass sie damit die Lebensgrundlage der ganzen Gruppe zu Grunde richten, also auch sich selbst. Die Parallelen zur Übernutzung unserer Ressourcen – von Erdöl bis zu sauberem Trinkwasser – liegen auf der Hand. Wenn Kooperatoren abtrünnig werden, sobald es um die Verwaltung kommunaler Güter geht, wie können wir dann je hoffen, das ökologische Kapital des Planeten für künftige Generationen zu bewahren?

Zum Glück ist nicht jede Hoffnung verloren. Mit einer Serie von Öffentliche-Güter-Spielen hat ein Team um Manfred Milinski vom Max-Planck-Institut für Evolutionsbiologie in Plön mehrere Faktoren aufgezeigt, durch die Menschen motiviert werden, mit Gemeingut pfleglich umzugehen. Die

GETTY IMAGES / REBECCA YALE

GETTY IMAGES / OSCAR TARNEBERG

Forscher gaben insgesamt 180 Versuchspersonen je 40 Euro und ließen sie per Computer an einem Spiel teilnehmen, bei dem es darum ging, mit dem Geld das Erdklima unter Kontrolle zu halten. Die Teilnehmer mussten in jeder Spielrunde einen Teil ihres Gelds in einen gemeinsamen Topf spenden. Falls er nach zehn Runden mindestens 120 Euro enthielt, galt das Klima als sicher, und die Spieler konnten ihr Restgeld behalten. Wenn sie weniger als 120 Euro aufbrachten, brach das Klima zusammen, und jeder verlor sein gesamtes Guthaben.

Obwohl die Spieler das Ziel des Klimaschutzes oft – wenn auch nur um ein paar Euro – verfehlten, ließen sich von Runde zu Runde Verhaltensänderungen beobachten, die zeigen, wodurch Großmut entsteht. So wurden die Spieler altruistischer, wenn sie von Autoritäten über Klimaforschung informiert wurden. Offenbar müssen Menschen überzeugt werden, dass ein echtes Problem besteht, damit sie für das Gemeingut Opfer bringen. Die Spieler verhielten sich auch großzügiger, wenn sie ihre Spende nicht anonym, sondern öffentlich leisten durften – das heißt, wenn ihre Reputation auf dem Spiel stand. Auch eine andere Untersuchung an der Newcastle University (England) unterstrich die Bedeutung der Reputation: Wenn Menschen sich beobachtet fühlen, werden sie spendabler.

Diese Faktoren kommen jeden Monat ins Spiel, wenn ich meine private Gasrechnung erhalte. Die Aufstellung vergleicht den Verbrauch meines Haushalts mit dem Durchschnittsverbrauch meiner Nachbarschaft und stellt ihn außerdem dem Aufwand der Wohnungen gegenüber, die am meisten Energie sparen. Der Vergleich mit dem Gaskonsum der Nachbarn motiviert meine Familie, weniger Gas zu verbrauchen; jeden Winter versuchen wir die Heizungstemperatur um ein Grad zu senken.

Den Computersimulationen zufolge ist Kooperation »evolutionär instabil«; das heißt, Perioden, in denen sie dominiert, gehen unweigerlich in einen Zustand grassierender Abtrünnigkeit über. Doch trotzdem scheint der Altruismus immer wieder aufzuflackern und wenigstens Episoden von Gemeinsinn zu schaffen. Zyklen von Kooperation und nacktem Egoismus prägen das Auf und Ab der Menschheitsgeschichte; sie erzeugen die unruhigen Schwankungen politischer und finanzieller Systeme. An welchem Punkt wir uns derzeit befinden, ist ungewiss, aber zweifellos müssten wir besser zusammenarbeiten, um die dringendsten Probleme zu lösen. Die Spieltheorie weist einen Weg. Die politisch Verantwortlichen sollten die indirekte Reziprozität berücksichtigen und Information und Reputation nutzen, um rücksichtslose Egoisten in Schach zu halten. Nur so können wir das größte aller Öffentliche-Güter-Spiele bestehen: Sieben Milliarden Menschen sollen die rapide schwindenden Ressourcen des Planeten Erde schützen. ~

DER AUTOR

Martin A. Nowak ist Professor für Biologie und Mathematik an der Harvard University und leitet dort das Programm für Evolutionsdynamik. Seine Forschung konzentriert sich auf die mathematischen Grundlagen der Evolution.

QUELLEN

Nowak, M.A.: Five Rules for the Evolution of Cooperation. In: Science 314, S. 1560–1563, 2006

Nowak, M.A., Highfield, R.: Super Cooperators: Altruism, Evolution, and Why We Need Each Other to Succeed. Free Press, New York 2012

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1165737**

MATHEMATIKGESCHICHTE

Von der Schipiste in den abstrakten Wahrscheinlichkeitsraum

In diesen Tagen jährt sich zum 25. Mal der Todestag eines der größten Mathematiker des 20. Jahrhunderts: Andrei Nikolajewitsch Kolmogorow.

VON MARC DRESSLER

Nein sagen will gelernt sein – und zweimal Nein sagen erst recht. Dass die doppelte Verneinung einer Aussage dasselbe sei wie die Aussage selbst – das glaubt der Normalmensch und mit ihm der gewöhnliche mathematische Logiker. Nicht so die Intuitionisten um Luitzen E. J. Brouwer (1881–1966), die in den 1920er Jahren an den Grundfesten der Mathematik rüttelten. Um eine Aussage als wahr anzuerkennen, genügte es ihnen nicht, wenn ihre Verneinung auf einen Widerspruch führte; sie forderten einen direkten Beweis ein. Auf der anderen Seite in diesem »Grundlagenstreit der Mathematik« stand der allgemein anerkannte Großmeister der Mathematik, David Hilbert (Spektrum der Wissenschaft 1/2012, S. 72).

In diesen Kampf der Giganten wird Andrei Nikolajewitsch Kolmogorow gewissermaßen hineingeboren. Am 25. April 1903 kommt er im zentralrussischen Tambow zur Welt. Seine Mutter stirbt bei seiner Geburt, sein Vater verlässt die Familie; aber seine Tante Vera adoptiert den Jungen und erzieht ihn auf dem Gut seines Großvaters in Jaroslawl. Obgleich der auch eine teure Privatschule hätte finanzieren können, kommt Andrei auf ein kostengünstiges Gymnasium in Moskau. Kaum Student an der Moskauer Universität, veröffentlicht er mit 19 Jahren eine Arbeit zur Mengentheorie. Ein Jahr später kann er eine Vermutung seines Lehrers Nikolai Lusin zur Fourier-Analyse in Gewissheit verwandeln – indem er sie widerlegt. Ein Geniestreich, der die Fachwelt aufhorchen lässt! Und kaum hat er mit 22 Jahren sein Studium abgeschlossen, meldet er sich zum Grundlagenstreit zu Wort.

Wo die Giganten darum kämpfen, was man als Aussage (oder »Satz«) einer Theorie anerkennen darf und was nicht, arbeitet Kolmogorow vorrangig mit dem Begriff »Aufgabe«. Die Änderung wirkt zunächst unscheinbar, denn zwischen der Aufgabe »Ziehe durch drei gegebene Punkte einen Kreis« und dem Satz »Durch drei gegebene Punkte, die nicht auf einer Geraden liegen, gibt es stets genau einen Kreis« ist kein fundamentaler Unterschied zu sehen. Man beweist halt den Satz, indem man beschreibt, wie die Aufgabe zu lösen ist.

Aufgabenlogik statt Aussagenlogik

Entsprechend passt zu dem Satz »Die fermatsche Vermutung ist falsch« die Aufgabe »Widerlege die fermatsche Vermutung«. Wohlgemerkt: Als Kolmogorow seine Schrift »Zur Deutung der intuitionistischen Logik« veröffentlicht, schreiben wir das Jahr 1932 und wissen noch nicht mit Gewissheit, dass der Satz falsch und die Aufgabe unlösbar ist. Wie hätte man die fermatsche Vermutung widerlegen können? Indem man ein Gegenbeispiel angibt. Aber aufgepasst: Die Aufgabe »Finde natürliche Zahlen a, b, c und n, so dass $n>2$ ist und die Gleichung $a^n + b^n = c^n$ gilt« ist verschieden von der Aufgabe »Widerlege die fermatsche Vermutung«! Nach dem damaligen Stand des Wissens ist folgende paradoxe Situation durchaus denkbar: Man kann erstens beweisen, dass es ein Gegenbeispiel geben muss, und zweitens, dass es prinzipiell unmöglich ist, eines explizit anzugeben. Eine solche Beweisführung würde Hilbert akzeptieren, Brouwer aber nicht.

Kolmogorow konstruiert analog zum Aussagenkalkül einen Aufgabenkalkül: $a \wedge b$ bedeutet »Löse die Aufgaben a und b«, $a \vee b$ heißt »Löse mindestens eine der Aufgaben a und b«, und $a \supset b$ schließlich »Zeige, dass aus a b folgt« oder »Führe die Lösung von b auf die von a zurück«. Nur die Verneinung ist sehr speziell: $\neg a$ heißt nicht etwa »Beweise die Unlösbarkeit von a«, sondern »Leite aus der Voraussetzung, dass die Lösung von a gegeben ist, einen Widerspruch her«; und das ist im Allgemeinen schwieriger.

Entsprechend ist die Aufgabe $\neg\neg a$ nicht dasselbe wie die Aufgabe a. Und der Satz vom ausgeschlossenen Dritten, den ein Aussagenlogiker schlicht als $a \vee \neg a$ schreiben würde (»Für jede Aussage a gilt: Entweder a selbst oder die Verneinung von a ist wahr«), gleicht in der Aufgabenlogik interpretiert einer Allmachtsfantasie: »Ich kann jede Aufgabe entweder lösen oder die Annahme ihrer Lösbarkeit auf einen Widerspruch führen.« Das kann selbst der große Hilbert nicht für sich in Anspruch nehmen, auch wenn er die Mathematik gerne in diese beneidenswerte Lage bringen möchte. Aber die Hoffnung ist vergebens: Ungefähr um dieselbe Zeit beweist Kurt Gödel, dass dieses Ziel prinzipiell unerreichbar ist.

Formal ist Kolmogorows Aufgabenkalkül mit dem Aussagenkalkül der Intuitionisten identisch, allerdings ohne sich auf deren erkenntnistheoretische Denkverbote einzulassen. So hilft er so-

wohl die Unterschiede als auch die Bezüge zwischen den beiden Denkrichtungen klarer herauszuarbeiten.

Die Arbeit schließt mit dem programmatischen Satz: »Für die Mathematik folgt daraus, dass man die Lösung von Aufgaben als ihren [der Mathematik] selbstständigen Zweck (neben dem Beweis von theoretischen Aussagen) betrachten soll.« Insofern Aufgaben an die Stelle von Aussagen treten, können sich die modernen Didaktiker, welche die Mathematik vom Formelnpauken befreien und das Problemlösen ins Zentrum des Unterrichts stellen wollen, auf Kolmogorow berufen.

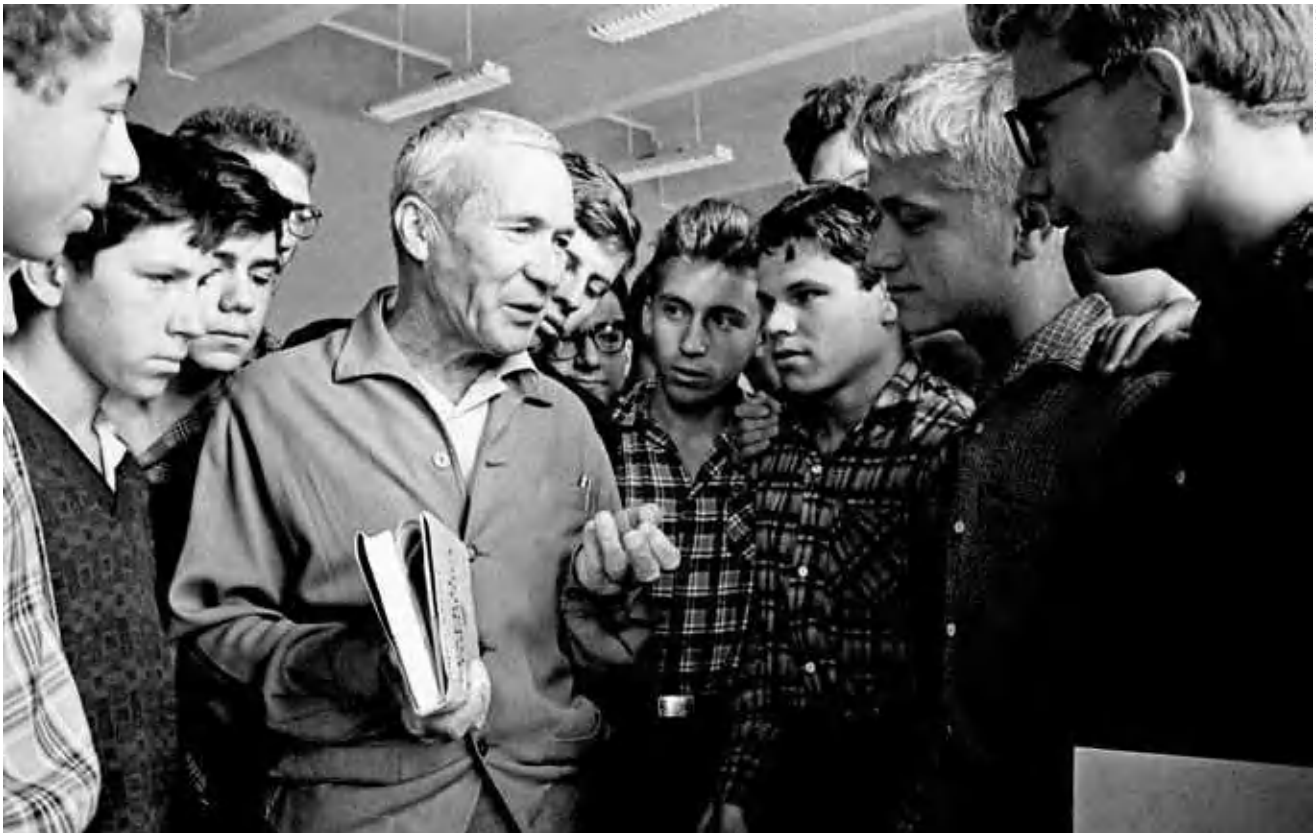
Es hat ganz den Anschein, als würde der große russische Mathematiker seinem eigenen Programm folgen. Das Grübeln über theoretische Sätze ohne Weltbezug ist seine Sache nicht; seine Mathematik entspringt dem Leben. Von Elfenbeinturm keine Spur. Die unbeheizten Seminarräume der Moskauer Universität bieten in klirrenden Wintern eh keine dauerhafte Heimstätte. Da steigt der Student, der nicht nur in Mathematik, sondern auch in Geschichte eingeschrieben ist und die Besiedlung von Nowgorod im 16. Jahrhundert erforscht, lieber auf die Schier.

Sobald der Schnee schmilzt und das Eis taut, fährt Kolmogorow ungefähr 100 Kilometer nord- oder südwärts, um in der Wolga beziehungsweise der Oka die ersten Schwimmzüge des Frühjahrs zu tun. Im Frühling und Herbst zieht es ihn zum Bergsteigen in den Kaukasus (Bild S. 85). Und dort erschließt er sich die Mathematik, die er dann abends auf der Veranda seiner Datscha zu Papier bringt. In Moskau verdient er nur sein Geld, zuerst als Lokführer, ab 1931 dann als Professor. Arbeiten aber tut Kolmogorow unter freiem Himmel, in den Bergen und Wäldern, an den Flüssen und Seen Russlands.

Er forscht über das Wachstum von Kristallen, die Statistik russischer Gedichte, die Geometrie pflanzlicher Wechselwirkungen und die Ausbreitung vorteilhafter Gene. Aber die größte Wirkung auf die Fachwelt erzielen seine Arbeiten zur Wahrscheinlichkeit. Sein 1933 in deutscher Sprache vorgelegter Band »Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitsrechnung« entlässt die Wahrscheinlichkeitstheorie auf einen Schlag in die disziplinäre Selbstständigkeit.

Bemerkenswerterweise sagt Kolmogorow an keiner Stelle des Buchs, was Wahrscheinlichkeiten »eigentlich« sind. Er erklärt nur, wie man mit ihnen rechnet. Das, so stellt sich heraus, genügt für alle praktischen Zwecke. Hier wiederholt sich ein allgemeines Muster der Mathematik. Was ist eine irrationale Zahl »eigentlich«? Oder überhaupt eine Zahl? Wer den naiven Standpunkt nicht akzeptiert, man wisse aus Kindertagen, was eine Zahl sei, muss einen beträchtlichen formalen Aufwand treiben. Verglichen damit ist das Rechnen mit diesen Zahlen eine ziemlich einfache Sache.

Andrei Kolmogorow (hier im Gespräch mit Schülern 1968 in Moskau) setzte sich zeitlebens dafür ein, junge Menschen an die Mathematik heranzuführen.



CORBIS / YEVGENY KHALDEI

Die historisch früheste Anwendung der Wahrscheinlichkeitsrechnung ist das Glücksspiel, und die Folge der Zahlen, die beim wiederholten Werfen einer Münze, eines Würfels oder einer Roulettkugel entsteht, ist das klassische Beispiel einer Zufallsfolge. Aber wenn ein undurchschaubarer Automat die Zahlen liefert oder ein überaus fingerfertiger Mitspieler die Karten austeilt: Woher wissen wir, dass das wirklich eine Zufallsfolge ist?

Kolomogorow findet 1965 das begriffliche Mittel, um diese Frage zu beantworten: die algorithmische Komplexität. Eine Folge von Beobachtungen ist dann rein zufällig, wenn sich ihre Komplexität nicht vermindern lässt. Wie aber lässt sich die Komplexität einer Folge messen? An der Länge des kürzesten Algorithmus, der die Folge erzeugt. Der kürzeste Algorithmus für die eintönige Folge (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, ...) fällt kürzer aus als der für (1, 4, 1, 5, 9, 2, 6, 5, ...). Und der ist noch einigermaßen kurz; denn die Folge besteht aus den Nachkommastellen von π, und die sind – wenn auch etwas mühsam – eine nach der anderen mit einem automatischen Verfahren berechenbar. Bei einer echten Zufallsfolge dagegen gibt es keinen Zusammenhang zwischen den Folgengliedern, also auch keinen Algorithmus, der einen solchen Zusammenhang beschreiben könnte. Der kürzeste Algorithmus, der die Folge wiedergibt, besteht in der schlichten Auflistung ihrer Werte und ist damit genauso lang wie die Folge selbst.

Gute Beziehungen zur Kommunistischen Partei

Wer eine solche Folge aus der Beobachtung eines physikalischen Prozesses erhält, wird demnach den Prozess als zufällig bezeichnen, wenn die Komplexität mit jeder neuen Beobachtung schnellstmöglich zunimmt, wenn sich also kein Weg findet, die neuen Beobachtungen aus den alten herzuleiten. Damit kommt die algorithmische Komplexität unserer alltäglichen Vorstellung sehr nahe, wonach Zufall dort herrscht, wo es an Regelmäßigkeiten gebricht.

Diese Idee kommt erst richtig zum Tragen, als die Computer in den 1970er Jahren weite Verbreitung finden. Nunmehr kann man die Komplexität eines Prozesses an der Länge des kürzesten Programms messen, das den Prozess hervorbringt. Unabhängig von Kolmogorow haben kurz zuvor Ray Solomonoff (1926–2009) und wenige Jahre später Gregory Chaitin (* 1949) denselben Begriff gefunden und zu einer algorithmischen Informationstheorie ausgearbeitet (Spektrum der Wissenschaft 2/2004, S. 86, und 9/2006, S. 54).

Bereits 1953 findet Kolmogorow eine revolutionäre Theorie zum Verhalten dynamischer Systeme, die insbesondere Aussagen über die Stabilität des Sonnensystems erlaubt. Aber erst nachdem sein Schüler Wladimir Arnold (1937–2010) sowie Jürgen Moser (1928–1999) sie ausgearbeitet haben, gewinnt sie unter dem Namen KAM-Theorie (nach den Initialen ihrer Schöpfer) große Verbreitung (Spektrum der Wissenschaft 12/1994, S. 86).

Von dieser Revolution ist mehr geblieben als vom Sturz des Zaren und der bürgerlichen Regierung, die Kolmogorow noch als Gymnasiast in Moskau erlebt hat. Zu den Umwälzungen in Russland prophezeit Kolmogorow während des Zweiten Weltkriegs: »In 20 Jahren wird niemand mehr wissen, was in unserem Land wirklich geschehen ist.«

Da spricht ein Kundiger. Zur Kommunistischen Partei der Sowjetunion hat er offenbar einen guten Draht. Schon kurz nach seiner Aufnahme 1939 in die Russische Akademie der Wissenschaften bekommt er den begehrten Posten des Sekretärs, vorbei an langjährigen und verdienten Mitgliedern, die eigentlich an der Reihe gewesen wären. Es heißt, Stalin selbst habe die Besetzung der Stelle mit Kolmogorow befürwortet. Was den Mathematiker nicht davon abhält, offen den Konflikt mit Stalins wissenschaftlichem Protegé, Trofim Lysenko, zu suchen. Kurz nach seiner Ernennung veröffentlicht Kolmogorow einen Artikel, in dem er darlegt, dass die Versuchsergebnisse der Lysenko-Schule entgegen ihrem Dogma die mendelschen Gesetze der Vererbung bestätigten.

Was den früh schon international renommierten Mathematiker so schützt, dass er sich solche Spitzen unbeschadet erlauben darf, liegt bislang im Dunkeln. Kolmogorows Rolle in der Sowjetunion, vor allem aus Sicht der Machthaber,

BULLETIN OF THE LONDON MATHEMATICAL SOCIETY 22, S. 31–100, 1990, PLATE I

Im Kreis der Fachkollegen auf einer Tagung in Tiflis 1963.

BULLETIN OF THE LONDON MATHEMATICAL SOCIETY 22, S. 31–100, 1990, PLATE III

Beim Wandern im Kaukasus.

harrt noch der Klärung. Immerhin wirkt Kolmogorow als Staatsbeamter an geheimen Forschungsprojekten mit und berät regelmäßig die Regierung. Für den Titel »Held der sozialistischen Arbeit« sowie den Lobatschewski-Preis wird er ebenfalls für würdig befunden.

Zudem gehört er zu den drei Mathematikern, denen Stalin 1954 erlaubt, an einem Kongress im Ausland teilzunehmen. Kolmogorow reist, die damals längeren Bahnhofsaufenthalte zum Schwimmen in Flüssen nutzend, mit dem Zug zum mathematischen Weltkongress nach Amsterdam und hält einen der beiden Hauptvorträge über die grundlegenden Ideen, aus denen später die KAM-Theorie wird.

Die dynamischen Systeme dieser Theorie sind deterministisch. Das heißt, durch die Anfangswerte ist das gesamte Schicksal des Systems für alle Zeiten bestimmt – auch wenn häufig das konkrete Systemverhalten von einer regellosen Irrfahrt nicht zu unterscheiden ist. Doch Kolmogorows Axiomatik versetzt ihn in die Lage, auch dynamische Systeme mit Zufallsanteil (»stochastische dynamische Systeme«) zu untersuchen. Er betrachtet die Menge aller möglichen Systemzustände als einen abstrakten Raum (den »Phasenraum«) und fragt, mit welcher Wahrscheinlichkeit der Systemzustand in gewissen Teilmengen des Phasenraums zu finden ist. Eine so vorsichtig formulierte Frage findet dann möglicherweise sogar eine brauchbare Antwort, während die Lösung des klassischen Problems (»Welchen Zustand hat das System in einer Million Jahre?«) praktisch oder sogar prinzipiell unmöglich ist.

Es trifft sich günstig, dass Kolmogorow damals seinen Wahrscheinlichkeitsbegriff so überaus abstrakt formuliert hat. Damit passt er nämlich auch auf einen Phasenraum mit unendlich vielen Dimensionen. Auch die Komplexität hält Einzug in das Studium dynamischer Systeme, allerdings unter dem Namen Entropie.

Die von Kolmogorow vorgeschlagenen Definitionen für Komplexität und Entropie in dynamischen Systemen sind zwar mangelhaft. Das hindert aber Heerscharen begabter Mathematiker nicht daran, auf seine Initiative hin die Grundbegriffe dynamischer Systeme zu überarbeiten und eine statistische Mechanik zu etablieren.

Der Gemeinde der Mathematiker genügt meist ein kurzer Artikel des Meisters, um die darin beschriebene Aufgabe und die Fruchtbarkeit des Lösungsansatzes zu erkennen. Kolmogorow verfasst in diesem Sinn anregende Beiträge auf allen Gebieten der Mathematik – mit Ausnahme der Zahlentheorie. Allerdings mag er Trost in der Tatsache finden, dass ihm schon als Fünfjährigem auffiel, dass $1=1^2$, $1+3=2^2$, $1+3+5=3^2$, ... ergibt.

Sehr viel liegt ihm daran, junge Menschen an die Mathematik heranzuführen und zu fördern, seien es Fünfjährige, Gymnasiasten oder Studenten (Bild S. 83). Er schreibt zahlreiche Bücher für den Schulunterricht, gründet an der Moskauer Universität eine mathematisch-physikalische Sommerschule für Hochbegabte, reformiert die Studienordnung der Fakultät für Mathematik und ist Vorsitzender der Kommission für die Reform des Schulunterrichts am Kultusministerium der UdSSR.

Seine Wertschätzung für den mathematischen Nachwuchs zeigt sich besonders in den Wirren des Zweiten Weltkriegs. Als Kolmogorow im Oktober 1941 telefonisch Order erhält, sich sofort mit Handgepäck in den bereitgestellten Zug nach dem östlich gelegenen Kasan zu begeben, um dem bevorstehenden Einmarsch der Deutschen in Moskau zu entkommen, packt der Mathematikprofessor statt Brot oder warmer Wäsche die Manuskripte seiner Studenten in seine Ledermappe. Die danken es ihm noch heute.

Am 20. Oktober 1987 ist Andrei Kolmogorow in Moskau verstorben.

DER AUTOR

Marc Dressler ist promovierter Philosoph und Wissenschaftsjournalist in Stuttgart.

QUELLEN

Jaynes, E.T., Bretthorst, G.L.: Probability Theory. Cambridge University Press, Cambridge 2011

Kendall, D.G. et al.: Andrei Nikolaevich Kolmogorov (1903–1987). In: Bulletin of the London Mathematical Society 22, S. 31–100, 1990

Kolmogorow, A.N.: Une série de Fourier-Lebesgue divergente presque partout. In: Fundamenta Mathematicae 4, S. 324–328, 1923. http://matwbn.icm.edu.pl/ksiazki/fm/fm4/fm4127.pdf

Kolmogorow, A.N.: Zur Deutung der intuitionistischen Logik. In: Mathematische Zeitschrift 35, S. 58–65, 1932. http://gdz.sub.uni-goettingen.de/dms/load/img/?PPN=GDZPPN002373467

Nikol'skii, S.M.: The Great Kolmogorov. In: Bolibruch, A. A. et al. (Hg.): Mathematical Events of the Twentieth Century. Springer, Heidelberg 2006

Vitanyi, P.: Andrey Nikolaevich Kolmogorov. www.scholarpedia.org/article/Kolmogorov

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1166684

MARIA STENZEL

Mit dem Eisbrecher »Nathaniel B. Palmer« versuchten Wissenschaftler 2010, über das Weddellmeer möglichst nahe an das Scar-Inlet-Schelf vor der Küste der Antarktischen Halbinsel zu gelangen. Dichtes Packeis stoppte sie jedoch kurz vor dem Ziel.

KLIMAWANDEL

Eisschmelze am Südpol

Während immer mehr Schelfeis rund um die Antarktische Halbinsel auseinanderbricht, mühen sich Wissenschaftler herauszufinden, wie sich dieser Kollaps auf die Gletscher im Inland auswirkt. Letztlich geht es dabei um die Frage: Steigt der Meeresspiegel noch viel schneller als bisher angenommen?

Von Douglas Fox

Vor 17 Jahren wurden zehn argentinische Soldaten Zeugen eines spektakulären Naturereignisses, das kein Mensch je zuvor beobachtet hatte. Die Männer waren in der Basis Matienzo stationiert, einer trostlosen Ansammlung von Blechhütten auf einem Vulkanfelsen 50 Kilometer vor der Antarktisküste. Schelfeis umschloss die Insel; mit 1500 Quadratkilometern Fläche hatte es fast die doppelte Größe Hamburgs. Obwohl es auf dem Meer schwamm, war es 200 Meter dick und so stabil wie Grundgestein.

Dennoch merkte Kapitän Juan Pedro Brückner, dass etwas nicht stimmte. Schmelzwasser hatte zahlreiche Tümpel auf dem Eis gebildet. Hin und wieder erklang ein gurgelndes Geräusch, wenn ein solcher Tümpel sich plötzlich durch ein Netz von Rissen in die Tiefe entleerte. Tag und Nacht spürten Brückners Männer Erschütterungen im Untergrund. Es fühlte und hörte sich an, als ob U-Bahn-Züge unter ihren Füßen vorbeiratterten. Das ominöse Poltern trat immer öfter auf.

Eines Tages, als die Mannschaft gerade in einer der Hütten zu Mittag aß, erhob sich ein Dröhnen, »fürchterlich laut, wie ein explodierender Vulkan«, erinnert sich Brückner. Die Männer stürzten nach draußen. Dort sahen sie, wie das Schelfeis um ihr kleines Eiland zerbarst. Das geschah so heftig, dass die Soldaten befürchteten, das turbulente Gewirr aus riesigen Schollen könnte den Felsen vom Untergrund losreißen und ins Meer drücken. Sie installierten Instrumente, die beim geringsten Kippen des Bodens Alarm geben sollten. Nach mehreren Tagen voller Anspannung wurde die Mannschaft schließlich per Helikopter in eine 200 Kilometer weiter nördlich gelegene Station ausgeflogen. Die Insel hielt stand, doch ihr eisiger Gürtel verschwand für immer.

Brückner und seine Kollegen hatten miterlebt, wie das Larsen-A-Schelf zersplitterte und sich auflöste. Doch das war erst der Anfang. Da warme Sommer von der Spitze Südamerikas aus immer weiter in den Nordteil der Antarktischen Halbinsel vorrückten, zerbrachen in den Folgejahren der Reihe nach drei weitere Eisschelfe an deren Ostseite.

Noch ist nicht völlig geklärt, was den Kollaps eines Eisschelfs unmittelbar auslöst. Fest steht aber: Sobald ein Schelf verschwindet, können Gletscher, die sich in Küstenfjorden dahinter aufgestaut haben, ungehindert in den Ozean gleiten. Diese Eiszufuhr vom Festland erhöht den Meeresspiegel. Der Bericht des Weltklimarats (IPCC) von 2007, der diesen Effekt noch nicht berücksichtigt, sagt einen Anstieg um 18 bis 59 Zentimeter bis zum Jahr 2100 voraus. Angesichts des reihenweisen Zerfalls von Eisschelfen befürchten Glaziologen jedoch, dass die Gletscher bis zu zehnmal so schnell schmelzen könnten – mit beunruhigenden Folgen für den Meeresspiegel.

Auf der Antarktischen Halbinsel lagert nur ein geringer Teil der gesamten Eisdecke des Kontinents. Dieser nach Norden ragende Sporn sei jedoch ein »natürliches Labor«, sagt Theodore Scambos, Glaziologe am National Snow and Ice Data Center in Boulder (Colorado). »Hier läuft der Vorspann zu dem Film, der in der übrigen Antarktis innerhalb der nächsten 50 bis 100 Jahre spielen wird.«

Das erklärt das große Interesse an diesem natürlichen Experiment. Wissenschaftler wollen unbedingt herausfinden, wie schnell die Eisschelfe zerfallen und was genau sie dazu

bringt, um den künftigen Meeresspiegelanstieg besser vorhersagen zu können. »Immer wieder sind die Vorhersagen zu konservativ und unterschätzen die Dimensionen des Wandels«, beklagt Robert DeConto, der den Kollaps des Schelfeises an der University of Massachusetts im Amherst am Computer simuliert. »Wir kommen mit unseren Modellen oft nicht weiter, weil uns grundlegende Daten fehlen.« Auf kürzlich durchgeführten Expeditionen zur Antarktis haben Forscher Instrumente aufgestellt, die DeConto und seinen Kollegen nach und nach die benötigten Informationen liefern. Die jüngsten Prognosen auf Basis dieser Daten sind alarmierend.

Der erste dokumentierte Kollaps eines antarktischen Eisschelfs ereignete sich vor 25 Jahren. Das Larsen-Inlet-Schelf, ein 350 Quadratkilometer großer Block nördlich von Larsen A, war auf einer Satellitenaufnahme von 1986 noch zu sehen. Auf dem nächsten Foto von 1988 fehlte jedoch der größte Teil von ihm. Niemand konnte damals erklären, was mit dem Eis geschehen war. Erst der Südsommer 1995 löste das Rätsel. Zusammen mit Larsen A zerbrach damals auch das 60 Kilometer weiter nördlich gelegene Prinz-Gustav-Schelf. »Das alles kam wie aus heiterem Himmel«, sagt Scambos, der gemeinsam mit Wissenschaftlern des British Antarctic Survey die Eisschelfe am Südpol über viele Jahre hinweg kontinuierlich per Satellit überwacht hat.

Das Verschwinden des Meereises hinterließ Spuren in der gesamten Region. Luftbilder aus der Zeit vor dem Zerfall des Prinz-Gustav-Schelfs zeigen den Sjögren-Gletscher mit einer glatten Oberfläche. Seine Zunge reichte, gleichmäßig abfallend, vom Festland weit in den Fjord hinein. Jetzt hingegen bietet er einen traurigen Anblick: Er ist von Rissen zerfurcht und in der Mitte eingesackt. Nach dem Kollaps des Prinz-Gustav-Schelfs bewegte er sich mit einem Mehrfachen seiner vorherigen Geschwindigkeit auf den nun freien Ozean zu. Auf seiner Oberfläche taten sich bis zu 20 Meter breite Spalten auf, weil die 600 Meter dicke Eiszunge beim beschleunigten Gleiten gedehnt wurde. Gewaltige Eisberge brachen von der Vorderkante ab, die dadurch jetzt 15 Kilometer weiter landeinwärts liegt. »Jeder Gletscher hinter einem Eisschelf ist nach dessen Kollaps schneller abgerutscht«, sagt Scambos. »Nicht nur ein wenig, sondern zwei-, drei-, fünf-, ja bis zu neunmal so schnell.«

AUF EINEN BLICK

ALARMIERENDES TAUWETTER

1 Die **Eisschelfe** an den Rändern der Antarktis sind dabei, sich aufzulösen. Durch den Wegfall dieser Barriere können die **Gletscher** im Hinterland schneller ins Meer gleiten.

2 Um den künftigen **Meeresspiegelanstieg** besser vorhersagen zu können, wollen Wissenschaftler herausfinden, warum und wie schnell die Eisschelfe zerfallen.

3 Satellitendaten sind nicht detailliert genug für akkurate Schätzungen. In jüngster Zeit haben Forscher deshalb in der Antarktis Instrumente installiert, welche die benötigten **Informationen liefern** sollen.

4 Die bisher gesammelten Daten legen nahe, dass der Meeresspiegel zwei- bis dreimal so schnell steigen wird, wie im letzten **Bericht des Weltklimarats** vorhergesagt.

MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de

Unser Online-Dossier »Polarforschung« finden Sie unter
www.spektrum.de/polarforschung

Eisberge so riesig wie Wolkenkratzer

Sieben Sommer später, im Jahr 2002, kollabierte das unmittelbar südlich von Larsen A gelegene Larsen-B-Schelf, das mehr als viermal so groß wie Hamburg und auch größer als das Saarland war. Binnen weniger Tage zerfiel es in Hunderte von Eisbergen, so gigantisch wie Wolkenkratzer. »Wir konnten Wale an Stellen sehen, wo sich kurz zuvor noch 300 Meter dickes Eis befunden hatte«, berichtet Pedro Skvarca, Glaziologe beim argentinischen Antarktis-Institut in Buenos Aires, der kurz nach dem dramatischen Ereignis per Flugzeug das Gebiet überflog. »Wir waren total verblüfft.«

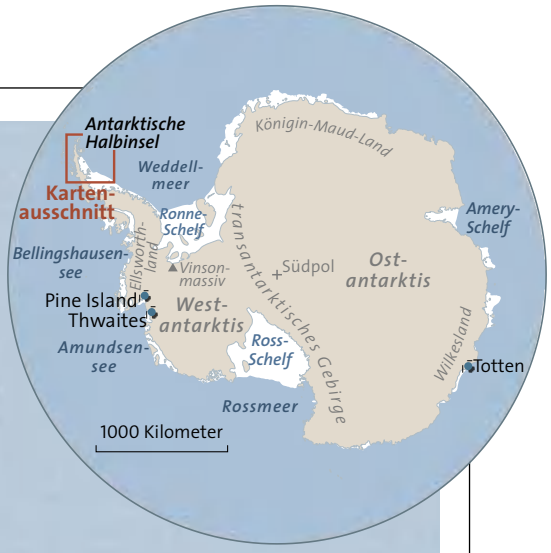
Wieder einmal ging die Barriere verloren, die den Gletscher dahinter stabilisierte. Dadurch rutschten mehr als 150 Kubikkilometer Eis vom Land in den Ozean. Zugleich hob sich wegen der starken Gewichtsentlastung die Erdkruste an dieser Stelle. Das zeigte ein hochgenaues GPS-Instrument, das auf der 150 Kilometer weiter westlich gelegenen Anvers-Insel installiert war. Demnach beschleunigte sich die tektonische Hebung von 0,3 auf 0,8 Zentimeter pro Jahr.

Auch intakte Eisschelfe »kalben« von Zeit zu Zeit: An ihrem Rand lösen sich Stücke ab, die so groß wie das Saarland sein können. Doch Larsen B zerbrach auf völlig andere Weise. Eine Serie von sieben Detailbildern des Satelliteninstruments MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), über 35 Tage hinweg aufgenommen, ließ erkennen, dass das Schelf in Hunderte von Eisbergen von nur etwa 130 Meter Breite, 160 Meter Tiefe und über einem Kilometer Länge zersplitterte. Die Fragmente kippten von der Kante des Eisschelfs hinab in den Ozean, wobei sie sich zur Seite drehten und den Blick auf das bläuliche Gletschereis unter ihrer weißen Schneedecke frei gaben. So etwas hatten Forscher nie zuvor gesehen.

Einzelheiten dieses Vorgangs versuchten Scambos und Skvarca erstmals im März 2006 herauszufinden. An einem düsteren, kalten Tag flogen sie in einem Hubschrauber der argentinischen Marine zu einer breiten Eistafel namens UK211. Diese war drei Jahre zuvor vom 385 Kilometer weiter südlich gelegenen Larsen-C-Schelf abgebrochen und driftete nun in wärmere Gefilde nördlich der Halbinsel. Die Forscher hofften, an ihr als Naturlabor den Zusammenbruch eines Eisschelfs studieren zu können.

Weniger Eis, mehr Schnee

Die globale Erwärmung hinterlässt im Bereich der Antarktischen Halbinsel deutliche Spuren. Weil die mittleren jährlichen Lufttemperaturen steigen, zerfallen Eisschelfe, und die Gletscher bewegen sich schneller Richtung Meer (ganz unten). Landeinwärts verdickt sich wegen stärkerer Schneefälle der Eisschild an manchen Stellen (Mitte rechts), doch insgesamt verliert die Antarktis bis zu 190 Milliarden Tonnen Eis pro Jahr.



Schelfeisverlust zwischen den 1950er Jahren und 2012

Schelfeis im Jahr 2012 (Larsen C im Jahr 2008)

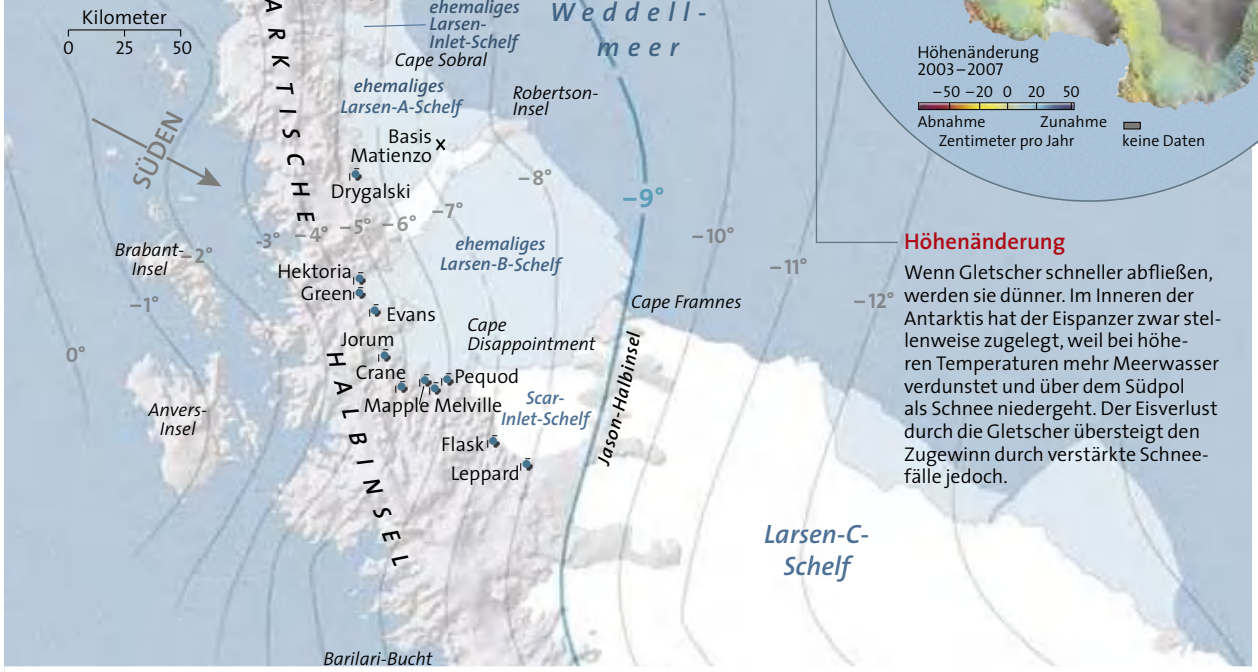
−8° mittlere Jahrestemperatur der Luft in Grad Celsius

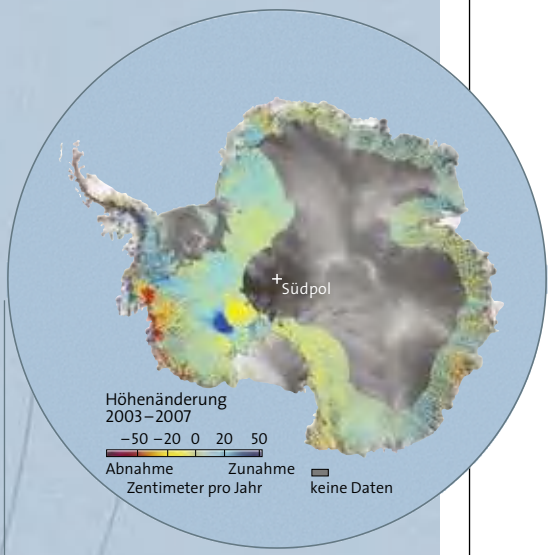
Gletscher

Temperaturanstieg

Als Folge des Klimawandels ist die Linie der Jahresdurchschnittstemperatur von −9 Grad Celsius entlang der Antarktischen Halbinsel immer weiter nach Süden gewandert. Nördlich von ihr haben sich alle Eisschelfe der Reihe nach aufgelöst. Demnach sollte das Scar-Inlet-Schelf als Nächstes verschwinden.

Saarland als Größenvergleich





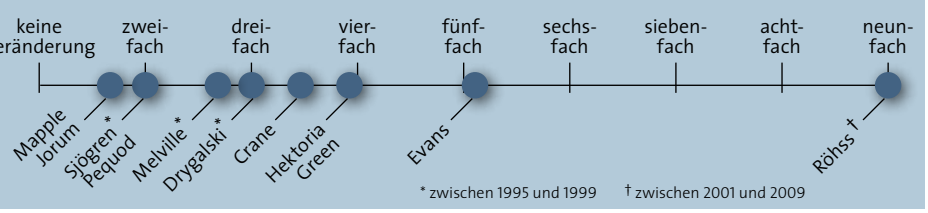
Höhenänderung

Wenn Gletscher schneller abfließen, werden sie dünner. Im Inneren der Antarktis hat der Eispanzer zwar stellenweise zugelegt, weil bei höheren Temperaturen mehr Meerwasser verdunstet und über dem Südpol als Schnee niedergeht. Der Eisverlust durch die Gletscher übersteigt den Zugewinn durch verstärkte Schneefälle jedoch.

Gletschergeschwindigkeit

Sobald ein Eisschelf zerfällt, gleiten Gletscher vom Festland dahinter schneller ins Meer (siehe Kasten auf S. 91). Ihre Fließgeschwindigkeit unterliegt zwar erheblichen Schwankungen, hat sich im Mittel aber deutlich erhöht.

Zunahme der Fließgeschwindigkeit von Gletschern zwischen 1999 und 2008



* zwischen 1995 und 1999 † zwischen 2001 und 2009

XNR PRODUCTIONS, NACH: ALISON COOK, SWANSEA UNIVERSITY (EISSCHELF- UND LUFTTEMPERATURDATEN); HAMISH PRITCHARD, BRITISH ANTARCTIC SURVEY (KARTE DER OBERFLÄCHEN); DE ANGELIS, H.; SKVARCA, P.: GLACIER SURGE AFTER ICE SHELF COLLAPSE. IN: SCIENCE 299, S. 1560–1562, 2003 (GESCHWINDIGKEIT DER GLETSCHER DRYGALSKI UND SJÖGREN); GLASSER, N.F. ET AL.: FROM ICE-SHELF TRIBUTARY TO TIDEWATER GLACIER: CONTINUED RAPID RECESSION, ACCELERATION AND THINNING OF RÖHSS GLACIER FOLLOWING THE 1995 COLLAPSE OF THE PRINCE GUSTAV ICE SHELF, ANTARCTIC PENINSULA. IN: JOURNAL OF GLACIOLOGY 57, S. 397–406, 2011 (GESCHWINDIGKEIT DES RÖHSS-GLETSCHERS); ROTT, H. ET AL.: THE IMBALANCE OF GLACIERS AFTER DISINTEGRATION OF LARSEN-B ICE SHELF, ANTARCTIC PENINSULA. IN: CRYOSPHERE 5, S. 125–134, 2011 (GESCHWINDIGKEITEN ANDERER GLETSCHER); BERGER: THEODORE SCAMBOS, NATIONAL SNOW AND ICE DATA CENTER; SAARLAND SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK

Die Landung war allerdings prekär. Wegen der einförmigen, milchig weißen Farbe der Eisfläche verlor der Pilot die Orientierung und setzte ziemlich schief auf, weshalb der Helikopter nach der Bodenberührung noch einen bedenklichen Sprung zur Seite machte. Doch zum Glück kippte er nicht um, so dass Scambos, Skvarca und vier andere Wissenschaftler unversehrt herausklettern konnten.

Das Team installierte eine Instrumentenstation des Systems AMIGOS (Automated Met-Ice-Geophysics Observing Systems), die aufzeichnen sollte, wie die Eistafel zerfiel. Eine GPS-Einheit diente zum Verfolgen der Position und eine meteorologische Station zur Messung von Wind und Temperatur. Außerdem dokumentierte eine Kamera die Schneeschmelze auf der Oberfläche. Sie ließ sich auf eine Reihe von Pfosten richten, welche die Forscher auf 2,2 Kilometer Länge am Rand des Eisbergs einschlugen. Während dieser sich auflöste, sollte die Neigung und Verschiebung der Pflöcke Rückschlüsse auf die Vorgänge im Eis erlauben.

Scambos und Skvarca verfolgten UK211 acht Monate lang, indem sie regelmäßig per Satellitentelefon mit AMIGOS kommunizierten. Der Eisberg maß ursprünglich zehn mal zwölf Kilometer. Mit der Zeit schrumpfte er auf die Hälfte. Am 23. November 2006 schließlich kam die letzte Meldung von der Instrumentenstation. Einige Tage später war UK211 verschwunden und AMIGOS im Meer versunken.

Die Forscher beobachteten im Verlauf der acht Monate viele Veränderungen auf dem Eisberg. Die entscheidende ereignete sich unmittelbar vor dem plötzlichen Zerfall, als sich die Oberfläche in wässrigen Schneematsch verwandelte. Was danach geschah, blieb allerdings im Dunkeln, weil AMIGOS da schon keine Informationen mehr sendete. Außerdem gab UK211 als frei schwimmender Eisberg keine Auskunft darüber, wie ein Gletscher hinter dem Schelfeis auf dessen Zusammenbruch reagiert.

Genau das hätte Scambos aber gerne gewusst. Deshalb nahm er 2010 an einer Expedition zu dem Eisschelf Scar Inlet teil, einem Überrest von Larsen B. Höhenmessungen der angrenzenden Gletscher durch ein Laser-Altimeter an Bord des Satelliten ICESat hatten ein Absinken ihrer Oberfläche dokumentiert: Die Eiszungen waren demnach dünner geworden.

ICESat ging jedoch 2009 außer Betrieb. Von anderen Satelliten durchgeführte Messungen mit interferometrischem SAR (Radar mit synthetischer Apertur) hatten außerdem langfristige Mittelwerte für die Fließgeschwindigkeit der Gletscher geliefert. Doch lassen sich mit dieser Methode keine plötzlichen Veränderungen wie etwa schnelle Vorstöße erfassen. Schließlich hatten die GRACE-Satelliten seit 2003 einen deutlichen Eisschwund registriert, indem sie die lokale Schwerkraft maßen. Allerdings war die Auflösung dieser Messungen mit einigen hundert Kilometern nur sehr gering.

Scambos rechnete mit dem Zerfall von Scar Inlet innerhalb weniger Jahre und wollte mit einer Reihe von Messfühlern auf der Oberfläche die Katastrophe aufzeichnen. »Unser Ziel ist, den Vorgang von Anfang an und detaillierter zu beobachten, als das per Satellit möglich ist«, erklärte er mir 2010 an Bord des 6000-Tonnen-Eisbrechers »Nathaniel B. Palmer«, wo ich ihn und zwei Dutzend Kollegen als Reporter auf dem Weg zum Südpol begleitete. »Wir wollen das große Finale sehen.«

Tückische Spalten im Schelfeis

Im Januar und Februar 2010 kämpfte sich das Schiff durch bis zu zwei Meter dickes Packeis vor der Antarktischen Halbinsel und versuchte 57 Tage lang immer wieder, zum Scar-Inlet-Schelf vorzudringen. Aber weil Meeresströmungen und Wind beständig mächtige Eisschollen gegen die Küste drückten, kam die »Palmer« nicht bis auf Helikopterreichweite heran. So ließ sich Scambos am 26. Januar gemeinsam mit vier weiteren Glaziologen, darunter Martin Truffer und Erin Pettit von der University of Alaska in Fairbanks, weiter nördlich an einer britischen Forschungsstation absetzen. Von dort brachte ein Flugzeug das Fünferteam zu seinem Untersuchungsort. Und so pendelte es in den nächsten drei Wochen per Propellermaschine zwischen der Station, dem Schelf und den angrenzenden Gletschern hin und her.

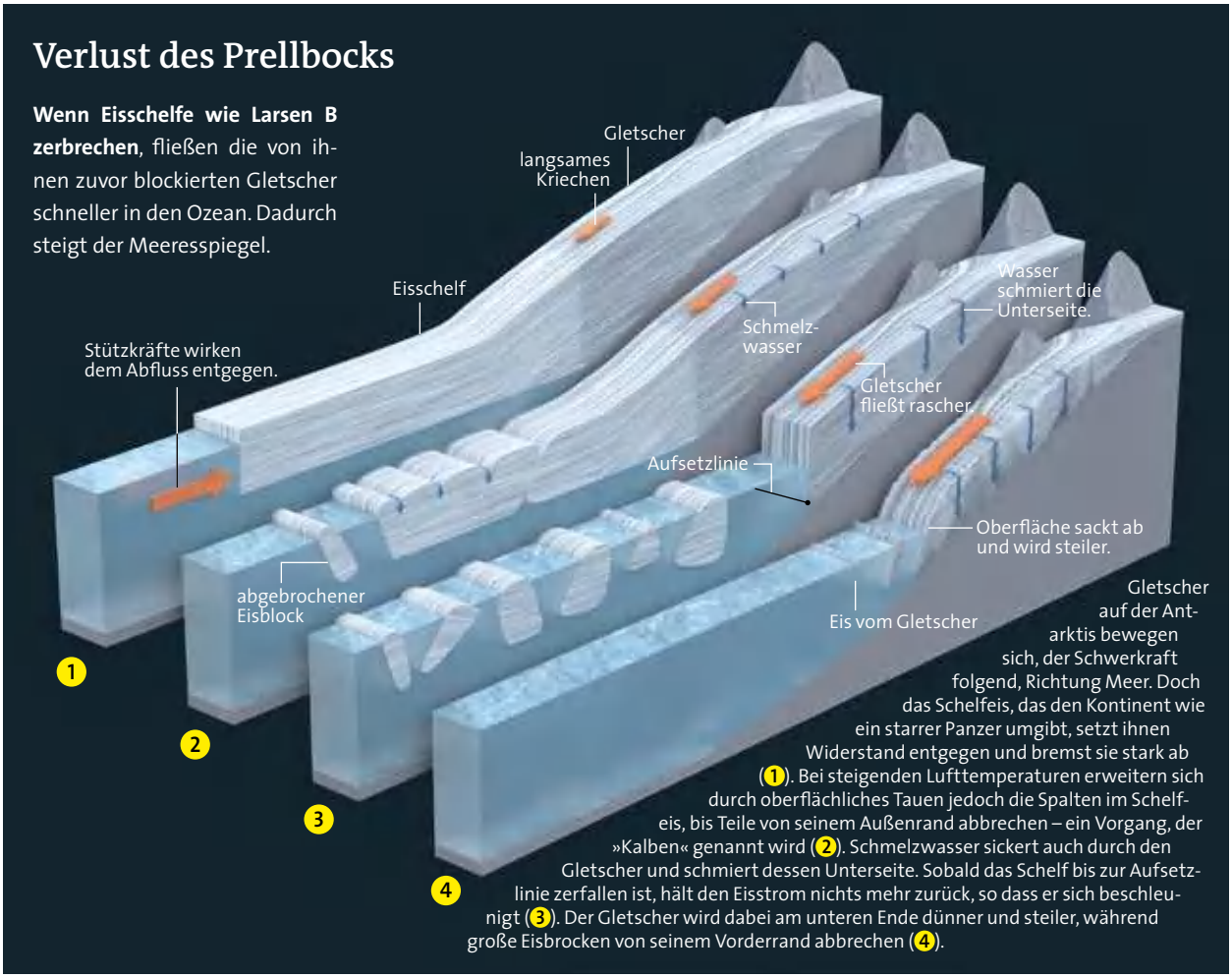
An Tagen mit weniger Schneegestöber installierten die Forscher AMIGOS auf Scar Inlet und auf dem unteren Abschnitt des Flask-Gletschers. Weiter oben sowie auf dem Leppard-Gletscher platzierten sie einfachere meteorologische und GPS-Stationen. Und auf einem Küstenvorsprung, der das Schelf überragt, montierten sie eine steuerbare Kamera.

Scar Inlet, wo Scambos und sein Team ein provisorisches Camp errichteten, bot einige Überraschungen. So brachen die Schaufeln beim Graben im Schnee immer wieder in Hohlräume ein – Spalten im Eis, die unter dünnen Schneekrusten verborgen lagen. Eines Tages versank der Flugzeugpilot bis zur Taille in einer solchen versteckten Öffnung. Diese Risse hatten sich zuvor wohl unter einer dickeren Schneedecke befunden, die in den ausnehmend warmen Sommern der letzten Jahre jedoch großenteils abgetaut war. Nun lagen sie dicht unter der Oberfläche.

Das Scar-Inlet-Schelf »steht auf der Kippe«, urteilt Scambos. Durch wiederholtes Auftauen und erneutes Gefrieren wird seine Oberfläche – so die Theorie des Forschers – immer härter werden, bis sich das Schmelzwasser in großen Tümpeln darauf sammeln kann, aus denen es sich über kurz oder

Verlust des Prellbocks

Wenn Eisschelfe wie Larsen B zerbrechen, fließen die von ihnen zuvor blockierten Gletscher schneller in den Ozean. Dadurch steigt der Meeresspiegel.



Gletscher auf der Antarktis bewegen sich, der Schwerkraft folgend, Richtung Meer. Doch das Schelfeis, das den Kontinent wie ein starrer Panzer umgibt, setzt ihnen Widerstand entgegen und bremst sie stark ab (1). Bei steigenden Lufttemperaturen erweitern sich durch oberflächliches Tauen jedoch die Spalten im Schelfeis, bis Teile von seinem Außenrand abbrechen – ein Vorgang, der »Kalben« genannt wird (2). Schmelzwasser sickert auch durch den Gletscher und schmiert dessen Unterseite. Sobald das Schelf bis zur Aufsetzlinie zerfallen ist, hält den Eisstrom nichts mehr zurück, so dass er sich beschleunigt (3). Der Gletscher wird dabei am unteren Ende dünner und steiler, während große Eisbrocken von seinem Vorderrand abbrechen (4).

BRYAN CHRISTIE

lang in frei gelegte Spalten ergießt. Die Wassermassen sollten durch ihr Gewicht diese Klüfte erweitern und vertiefen, bis sie den Grund des Eises erreichen. Die Druckwelle beim Aufbrechen einer Spalte fördert die Rissbildung an anderen, näher an der Küste gelegenen Stellen. Letztlich könnte das gesamte Eisschelf so innerhalb von nur wenigen Tagen zerfallen – vielleicht sogar innerhalb von Stunden.

Mit den AMIGOS-Instrumenten und den auch hier ins Eis gerammten Pflöcken hofft Scambos diese Theorie überprüfen zu können. Die Kameras werden zeigen, wie Schmelzwassertümpel entstehen und sich später in Spalten entleeren. Aufnahmen von den Pfostenreihen sollten erkennen lassen, auf welche Weise sich das Schelfeis dehnt und verformt. Die Kamera auf dem Küstenvorsprung zeichnet das Kalbungsmuster der Eisberge auf, während die Messgeräte auf den Gletschern Flask und Leppard zeigen, ob und wie diese sich beschleunigen, wenn das Eisschelf als Barriere wegfällt. Da Scambos Stationen im oberen und unteren Bereich der Eisströme aufgestellt hat, kann er feststellen, ob sie, wie vermutet, zunächst nur unten schneller fließen und sich dadurch dehnen und ausdünnen, so dass sich wie beim Sjögren-Gletscher Spalten bilden.

Laser-Höhenmessungen, die von dem inzwischen abgeschalteten ICESat und später von Flugzeugen durchgeführt wurden, haben ergeben, dass jene Gletscher auf der Antarktischen Halbinsel, die ihre Eisschelfe verloren haben, tatsächlich um fünf bis zehn Meter pro Jahr dünner werden. Die Frage lautet, in welchem Verhältnis das zur allmählichen Abnahme der Dicke seit dem Ende der letzten Eiszeit vor 12 000 Jahren steht. Ferner bleibt zu klären, ob ein Zerfall von Eisschelfen, wie er derzeit zu beobachten ist, wirklich nie zuvor in der jüngeren Vergangenheit stattgefunden hat.

Der Geologe Greg Balco vom Berkeley Geochronology Center, der auch mit an Bord der »Palmer« war, wollte dieser Frage nachgehen. Deshalb ließ er sich an einem kalten, wolkenverhangenen Morgen zusammen mit mir per Helikopter von dem Eisbrecher zum 30 Kilometer westlich gelegenen Sjögren-Gletscher bringen und am Fuß einer eisfreien, rundlichen Bergkuppe am Rand des Sjögren-Fjords absetzen. Das grau-weiß gestreifte Gestein zu unseren Füßen war spiegelglatt und von feinen Schrammen und Kratzern überzogen – Spuren, die der Gletscher vor Jahrtausenden hinterlassen hatte, als er noch dick genug war, um bis hier hinaufzureichen. »Die Politur sieht so frisch aus«, staunte Balco, »als wäre das

Eis erst vergangene Woche geschmolzen.« Überall ringsum verteilt lagen Steine, die nicht zum Untergrund passten – hier ein brauner vulkanischer Felsbrocken, dort ein Granitblock. Der Sjögren-Gletscher hatte sie von weit her gebracht und an ihrem heutigen Fundort abgelagert, als das Eis taute.

Balco benutzte diese Fremdkörper, um die Dickenänderungen des Sjögren-Gletschers während der vergangenen Jahrtausende zu ermitteln. Dazu stapfte er den Hang hinauf und sammelte in verschiedenen Höhenlagen Steine. Zu Hause untersuchte er diese später darauf, wie lange sie frei an der Oberfläche gelegen hatten. Dazu maß er winzige Mengen eines seltenen Isotops namens Beryllium-10, das entsteht, wenn kosmische Strahlen mit dem Stickstoff oder Sauerstoff in der Luft reagieren. Es gelangt mit dem Regen auf den Boden und schlägt sich dort auf frei liegendem Gestein nieder. Aus der Zeitspanne, welche die Felsbrocken in unterschiedlichen Höhenlagen am Berg Wind und Wetter ausgesetzt waren, wollte Balco schließlich ausrechnen, wie hoch der Gletscher jeweils gereicht hatte.

An einem der nächsten Tage sammelte der Forscher auch noch im Umkreis des Drygalski-Gletschers Steine ein. Ein Jahr später lagen die Ergebnisse der Analyse vor. Demnach haben sich beide Gletscher mindestens einmal innerhalb der letzten 4000 Jahre deutlich zurückgezogen. Sowohl das Prinz-Gustav-Schelf als auch Larsen A müssen während dieser Zeit also schon wenigstens einmal verschwunden sein.

Larsen B konnte Balco wegen des undurchdringlichen Packeisgürtels nicht erreichen. Doch Eugene Domack, Meeresgeologe und Professor für Umweltforschung am Hamilton College in Clinton (New York), der die Expedition von 2010 leitete, war bei früheren Fahrten schon dort gewesen. Er und seine Kollegen hatten seinerzeit bei drei Meter tiefen Bohrungen mehrere Proben der Ablagerungen am Meeresboden unter dem ehemaligen Schelf gewonnen.

Bohrkerne von Sedimenten unter freiem Wasser enthalten in der Regel mikroskopisch kleine Kieselalgen, die nach dem Absterben herabsinken, und sind dadurch grün gefärbt. Die Bohrproben von Larsen B bestanden jedoch nur aus Gletscherschliff, der sich in Lagen feinen, sandigen Lehms abgesetzt hatte. Sie reichten 11 000 Jahre zurück; das ergab die Radiokarbondatierung von Schalen darin eingebetteter einzelliger Mikroorganismen (Foraminiferen). Mindestens so lange war dieses Gebiet also von Eis bedeckt. Domack vermutet allerdings, dass das Larsen-B-Schelf schon seit Beginn der letzten Eiszeit vor 100 000 Jahren existierte. Sein Zerfall ist also ein Novum in der jüngeren Erdgeschichte.

Zurück von der Expedition zum Südpol verfolgte Scambos voller Spannung die Daten von Scar Inlet, die via Satellit in seinem Büro in Boulder eingingen. Aber im wichtigsten Punkt wurde er vorerst enttäuscht: Das Schelf ist bis heute noch nicht zusammengebrochen. Trotzdem vermittelten die darauf installierten Instrumente höchst interessante Einblicke in teils spektakuläre Vorgänge vor Ort. So meldete die AMIGOS-Station am 14. und 15. Juli, in der dunkelsten Zeit des südlichen Polarwinters, eine regelrechte Hitzewelle. Die Temperatur schoss plötzlich um 43 Grad Celsius nach oben und überschritt +10 Grad Celsius. In Boulder wäre das T-Shirt-Wetter. Auslöser waren westliche Föhnwinde: Von den Bergen der Halbinsel herabströmende Luft verdichtete und erwärmte sich. Auch die Temperaturfühler, die bei der AMIGOS-Station einige Meter tief im Eis vergraben waren, registrierten einen jähen Temperaturanstieg – vermutlich hervorgerufen von versickerndem Schmelzwasser.

Niemand weiß, wie oft eine solche Föhnlage auftritt. Generell haben ablandige Winde an den Küsten der Antarktis aber in den vergangenen 30 Jahren um durchschnittlich 10 bis 15 Prozent zugenommen. Sie blasen jetzt jedes Jahr 50 bis 150 Milliarden Tonnen Schnee von der Oberfläche des Kontinents ins Meer, wo er schmilzt.

Keine Regeneration des Eisschelfs im Polarwinter

Bis vor Kurzem herrschte die Ansicht, die Eisschelfe vor der Antarktischen Halbinsel würden nach der sommerlichen Tauperiode zumindest im Winter wieder mit reichlich frischem Schnee versorgt. Doch als Scambos mit seinem Team im November 2010 für Reparaturarbeiten zu den Stationen zurückkehrte, fand er Scar Inlet wie zu Anfang des Jahres von offenen Spalten durchzogen. Sogar die Fußabdrücke von damals sowie die Spuren, welche die Kufen des Flugzeugs hinterlassen hatten, waren noch sichtbar. Selbst im Winter schien sich das Schelf also nicht mehr zu erholen.

Bemerkenswert sind auch die Daten von drei Präzisions-GPS-Einheiten, die Domack schon vor 20120 im Gestein rund um Larsen B und Scar Inlet installiert hatte. Sie zeigen, dass sich die Region um 1,8 Zentimeter pro Jahr hebt. Das liegt Domack zufolge an der abnehmenden Dicke der Gletscher: Die Gewichtsentlastung lässt die vom Eis nach unten gedrückte Erdkruste wieder aufsteigen. Die gemessene Hebungsrate übertrifft die von einer 150 Kilometer entfernten GPS-Station registrierten 0,8 Zentimeter pro Jahr deutlich. Der Wert dürfte weiter zunehmen, wenn das Scar-Inlet-Schelf zerbricht und die Gletscher dahinter beschleunigt abfließen. Anhand dieser Hebung lässt sich laut Domack die abrutschende Eismenge schätzen. Solche Berechnungen bei Scar Inlet sollten eine genauere Vorstellung davon geben, wie viel Eis verschwinden wird, wenn andere, weiter südlich gelegene Schelfe sich auflösen.

Dass sie das tun werden, steht außer Frage. Ein Eisschelf scheint nur bis zu einer sommerlichen Durchschnittstem-

W I S wissenschaft in die schulen!

Didaktische Materialien für den Unterricht zum Thema »Klimawandel« kostenfrei herunterladen unter:

www.wissenschaft-schulen.de/eis

Ein Helikopter transportiert Instrumente zu Gletschern und Eisschelfen (rechts), und ein langer Sedimentbohrkern vom Meeresboden der Barilari-Bucht (unten) könnte verraten, wann das Wasser hier in vergangenen Jahrhunderten von Schelfeis bedeckt war.

FOTOS: MARIA STENZEL

peratur von maximal null Grad Celsius existieren zu können. Diese Null-Grad-Linie wandert derzeit an der Antarktischen Halbinsel entlang Richtung Süden auf das Festland zu. Jedes Eisschelf, über das sie bisher hinwegzog, ist im folgenden Jahrzehnt zerbrochen. Südlich von Larsen B und Scar Inlet kommt dann Larsen C an die Reihe. In seinem Nordteil bilden sich im Sommer schon Schmelzwassertümpel. Mit 49 000 Quadratkilometern ist Larsen C größer als Niedersachsen. Es wird von mehr Gletschern gespeist als alle bereits verschwundenen Eisschelfe zusammen.

Noch beunruhigender ist allerdings das Schicksal der Schelfeisgebiete vor dem antarktischen Festland, in die weitaus größere Gletscher münden. Statt von oben schmelzen sie auf Grund warmer Meeresströmungen von der Unterseite her. Im Endergebnis läuft das freilich auf das Gleiche hinaus: Das Pine-Island-Schelf ist seit 1994 um 15 Prozent dünner geworden und die Fließgeschwindigkeit des einmündenden Gletschers schon um 70 Prozent gestiegen.

Die Auswirkungen des Zerfalls von Eisschelfen auf den Gletscherschwund werden in ihrem vollen Umfang erst in einiger Zeit sichtbar werden. Laut einer 2011 von Scambos, Truffer und Pettit publizierten Untersuchung beschleunigt sich ein Gletscher selbst noch 15 Jahre nach dem Verlust seines Eisschelfs. So hat der Röhss-Gletscher, der bis 1995 in das seither verschwundene Prinz-Gustav-Eisschelf mündete, inzwischen das Neunfache seiner einstigen Geschwindigkeit erreicht.

Der beschleunigte Gletscherabfluss könnte auch eine Beobachtung von Eric Rignot und Isabella Velicogna vom Jet Propulsion Laboratory der NASA in Pasadena (Kalifornien) erklären. Demnach nimmt der Eisverlust der Antarktis derzeit um etwa 25 Kubikkilometer pro Jahr zu. Im IPCC-Bericht von 2007 ist die Auflösung von Eisschelfen nicht berücksichtigt. Deshalb liegt der vorausgesagte Meeresspiegelanstieg von 18 bis 59 Zentimetern bis zum Jahr 2100 »wahrscheinlich um einen Faktor von zwei bis drei daneben«, sagt Rignot. Der wahre Wert betrage wohl eher einen Meter. In einer 2009 publizierten Analyse schätzt ihn Martin Vermeer von der Universität Helsinki (Finnland) auf 75 bis 190 Zentimeter.

All das lässt es dringend geboten erscheinen, die Larsen-Region weiter intensiv zu beobachten. Leider macht es die Natur den Forschern ausgesprochen schwer. Vor der »Palmer«-Expedition 2010 war Domack schon fünfmal zu dem Gebiet unterwegs, konnte es wegen des Packeises aber nur zweimal erreichen. »Das kann wirklich frustrierend sein«, gesteht er. Doch die offenen Fragen treiben ihn und Scambos immer wieder zurück in diese unzugängliche Region.

DER AUTOR

Douglas Fox arbeitet als freier Journalist in San Francisco. Er schreibt für »Popular Mechanics«, »Esquire« und andere amerikanische Zeitschriften.

QUELLEN

De Angelis, H., Skvarca, P.: Glacier Surge after Ice Chelf Collapse. In: Science 299, S. 1560–1562, 2003

Domack, E. et al.: Stability of the Larsen B Ice Shelf on the Antarctic Peninsula during the Holocene Epoch. In: Nature 436, S. 681–685, 2005

Scambos, T. et al.: Calving and Ice-Shelf Break-up Processes Investigated by Proxy: Antarctic Tabular Iceberg Evolution during Northward Drift. In: Journal of Glaciology 54, S. 579–591, 2008

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1165738**

ÖKONOMIE

Finanzmathematik nach der Krise

Der Zusammenbruch von Lehman Brothers im September 2008 hat den bis dahin üblichen Verfahren für die Preisberechnung von Finanzprodukten die Grundlage entzogen. Inzwischen etablieren sich jedoch neue, kompliziertere Methoden und die zugehörigen Algorithmen.

Von Roland Stamm

Mathematische Formeln in der Finanzwirtschaft sehen manchmal so aus wie physikalische Gesetze und werden sogar mit ähnlichen Argumenten hergeleitet, sind aber etwas völlig anderes. Vor allem verlieren sie gelegentlich ihre Gültigkeit und müssen durch neue ersetzt werden, weil das Verhalten der Menschen, das diesen Formeln zu Grunde liegt, sich ändert. Das geschieht immer dann, wenn sehr viele Leute neue Erfahrungen machen und daraufhin ihre Erwartungen an die Zukunft revidieren.

Eine solche, sehr einschneidende Erfahrung ist die jüngste Finanzkrise, die mit der Pleite der Investmentbank Lehman Brothers am 15. September 2008 ihren spektakulären Höhepunkt fand. In ihrem Gefolge mussten etliche bis dahin allgemein akzeptierte Berechnungsverfahren verworfen und neu gefasst werden. Mittlerweile steht die Software, die dem täglichen Geschäft der Banken zu Grunde liegt, auf völlig neuen theoretischen Füßen.

AUF EINEN BLICK

WAS IST MEIN WERTPAPIER HEUTE WERT?

1 Vor der Finanzkrise galten **Darlehen zwischen Banken** als risikolos, da die Pleite einer großen Bank nicht als ernst zu nehmende Möglichkeit erachtet wurde.

2 Der **Zusammenbruch von Lehman Brothers** entzog den herkömmlichen Methoden, mit denen die Preise von Finanzprodukten berechnet wurden, die Grundlage.

3 Nach wie vor gibt es **risikolose Finanzprodukte**. Nur taugen diese nicht als Maßstab zur Bewertung gewöhnlicher risikobehafteter Geschäfte. Erst langsam beginnen sich neue Berechnungsmethoden zu etablieren.

Zum besseren Verständnis bietet sich ein Vergleich mit einem früheren und daher inzwischen besser durchschauten Paradigmenwechsel in der Finanzwelt an. Die Black-Scholes-Formel von 1973, welche die Finanzwelt so einschneidend veränderte, dass ihre Entdeckung bereits 1997 mit einem Wirtschaftsnobelpreis gewürdigt wurde (Spektrum der Wissenschaft 12/1997, S. 24), beruht auf einer Analogie zwischen dem Marktgeschehen und einem physikalischen Diffusionsprozess. In beiden Fällen berechnet sich ein globaler Effekt durch Mittelung über sehr viele kleine unabhängige Einzelereignisse: Stöße zwischen Molekülen bei der Diffusion, einzelne Käufe und Verkäufe bei der Entwicklung eines Aktienkurses. Daraus ergibt sich eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für die zukünftigen Zustände des Systems und aus dieser insbesondere ein fairer Preis für eine Aktienoption.

Beide Formeln sind sehr allgemein anwendbar und enthalten nur einen zahlenmäßigen Parameter, der die Besonderheiten des speziellen Stoffs beziehungsweise Wertpapiers erfasst: einerseits die Diffusionskonstante, andererseits die Volatilität, das ist das durchschnittliche Ausmaß, in dem der Kurs der Aktie (relativ zum jeweils aktuellen Kurs) von Tag zu Tag zu schwanken pflegt. Die Diffusionskonstante lässt sich aus einem geeigneten Experiment, die Volatilität durch Beobachtung des Aktienkurses bestimmen.

Damit sind alle Eingangsdaten für die Black-Scholes-Formel beisammen: Wenn jemand das Recht – aber nicht die Pflicht – erwerben will, zu einem Zeitpunkt T Monate in der Zukunft ein Wertpapier, das heute S Euro kostet, zu einem Preis von E Euro (dem »Strike«) zu kaufen, und obendrein der Zinssatz für eine risikolose Anlage bekannt ist, dann sagt ihm die Formel einen fairen Preis für dieses Recht. Das ist vor allem interessant für Optionen, für die der Markt noch keinen

LINKS: GETTY IMAGES / AFP / NICHOLAS ROBERTS; RECHTS: AKG IMAGES

Auf dem Höhepunkt der Finanzkrise 2008 fordern Demonstranten die Aktienhändler an der Wall Street auf, es ihren Vorgängern vom 25. Oktober 1929 gleichzutun. Die hatten sich wegen des Börsencrashs, der die damalige Weltwirtschaftskrise einläutete, in großer Zahl vom Balkon der Börse und aus den Fenstern zu Tode gestürzt (rechtes Bild).

Preis gefunden hat. Bis zum Aktiencrash vom Oktober 1987 galt die Formel zumindest unter Akademikern als korrekt (Spektrum der Wissenschaft 12/2009, S. 92).

Praktikern war jedoch von Beginn ihrer Verwendung an klar, dass etwas mit der Formel nicht stimmen konnte. Für ein konkretes Optionsgeschäft kann man mit ihr nicht nur aus der Volatilität den Preis errechnen – je höher die Volatilität, desto höher der Preis – sondern auch umgekehrt. Die so bestimmten Volatilitäten wichen von den in der Vergangenheit beobachteten Schwankungsbreiten erheblich ab. Die Volatilität ist also nicht so etwas wie eine Materialkonstante. Sie wird nicht gemessen, sondern – indirekt auf dem Weg über den Preis der Option – am Markt ausgehandelt.

Abschied von lieb gewordenen Theorien

Schlimmer noch: Nach dem Crash von 1987 brach das Konzept von der Volatilität als »Materialeigenschaft« eines Wertpapiers vollends zusammen. Entgegen dieser Theorie war die implizite, das heißt aus dem Preis zurückgerechnete, Volatilität eines Wertpapiers nicht für alle Optionen auf dieses Wertpapier dieselbe. Vielmehr ergaben sich für Optionen auf extreme Ereignisse – zum Beispiel heftige Kurssprünge nach oben oder unten – höhere Volatilitäten als für solche auf mäßige Kursschwankungen. Die entsprechende Kurve hat den Spitznamen »volatility smile« erhalten, weil sie einem lächelnden Mund entfernt ähnlich sieht (Bild S. 97).

Das heißt: Der Markt hatte durch die schlechten Erfahrungen beim Crash gelernt, dass extreme Kursschwankungen häufiger vorkommen, als nach der Theorie zu erwarten war, und forderte für diese Fälle entsprechend höhere Preise. Die Black-Scholes-Formel beruht – wie die Diffusionsgleichung – auf der Annahme, dass die Elementarereignisse, die Kursschwankungen auslösen, unabhängig voneinander und die Kurse selbst daher normalverteilt sind. Das trifft jedoch nicht zu. Vielmehr neigen Kurszuwächse dazu, sich selbst zu verstärken, weil Marktteilnehmer einen Trend zu erkennen glauben und dadurch die Nachfrage erhöhen. Noch ausgeprägter ist der Effekt bei fallenden Kursen, weil die Angst vor einem Verlust typischerweise größer ist als die Gier nach einem Gewinn. Der »volatility smile« ist also typischerweise ein ziemlich schiefes Grinsen.

Heute glaubt niemand mehr daran, dass die Formel mit einer einzigen Volatilität eine Aktie – oder Währung – korrekt beschreibt. Gleichwohl werden nach wie vor Volatilitäten veröffentlicht (»quotiert«) und zur Preisberechnung verwendet, jedenfalls für Optionen auf nicht exotische Ereignisse.

Während nach dem 1987er Crash die Theorie von einer »Materialeigenschaft« namens Volatilität beerdigt werden musste, fiel der gegenwärtigen Finanzkrise eine noch elementarere Grundannahme zum Opfer: dass nämlich Banken einander Geld zu einem zwar mit der Zeit schwankenden, aber doch jeweils einheitlichen Zinssatz ausleihen können. Seit

der Markt gelernt hat, dass auch ein sehr großes Institut pleitegehen kann, müssen die Banken beim Geldausleihen dieses Risiko mit einrechnen, was im Einzelfall nicht einfach ist.

Das klassische Mittel aus der Zeit vor der Krise ist die Diskontkurve. Sie beantwortet die Frage: Wie viel Geld müsste ich heute anlegen, um in einem, in zwei oder mehr Jahren einen Euro zurückzubekommen? Dabei geht es nicht darum, was ich mir zu dem zukünftigen Zeitpunkt für den Euro kaufen kann; die Geldentwertung wird nicht berücksichtigt.

Die Antwort auf die Frage hängt zunächst vom aktuellen Zinsniveau ab. Zur Zeit bekommt man auf dem Tagesgeldkonto bei einer Bank vielleicht 2 Prozent Zinsen pro Jahr, also müsste man der Bank 1/1,02 = 0,98039 Euro geben, wenn man in einem Jahr einen Euro ausgezahlt bekommen möchte. Zweitens muss man bei der Antwort die Kreditqualität oder – anders ausgedrückt – das Ausfallrisiko des Schuldners berücksichtigen, also jener Person oder Institution, die den Euro zu zahlen verspricht. Statt einer Bank könnte man sein Geld auch der Bundesrepublik Deutschland geben. Die bietet allerdings einen deutlich geringeren Zinssatz für Anlagen über ein Jahr, nämlich aktuell null Prozent. Das heißt, dass ein Euro in einem Jahr heute ebenfalls einen Euro wert ist. Oder man gibt es der spanischen Staatskasse für 5 Prozent, wohl wissend, dass dieses Geld durchaus verloren gehen kann. Somit ist ein »spanischer Euro« heute 1/1,05 = 0,95238 Euro wert. Es ergibt sich also für jeden Schuldner eine Preisliste, die so genannte Diskontkurve, die zu jedem zukünftigen Datum zeigt, wie viel ein dann gezahlter Euro heute wert ist (Bild S. 99). Diese Zahl, den »Diskontfaktor«, bezeichnen wir im Folgenden als $f(t)$, wobei t die Laufzeit in Jahren ist. Den heutigen Wert einer zukünftig eingehenden Zahlung beliebiger Höhe erhält man dann, indem man den Betrag mit dem Diskontfaktor $f(t)$ für den Zeitraum t multipliziert. Man spricht auch vom Abdiskontieren von Zahlungen.

Wohlgemerkt: Der »heutige Wert« einer zukünftigen Zahlung ist zwar eine handfeste Größe insofern, als er den Preis angibt, zu dem man heute – in aller Regel – den Anspruch auf diese Zahlung kaufen oder verkaufen kann. Aber er ist zugleich Ausdruck der Erwartungen des Marktes, und die können sich bereits morgen erheblich ändern. So sinkt der Wert, wenn die Befürchtung anwächst, dass der Schuldner zahlungsunfähig wird. Wenn allerdings diese Katastrophe ausbleibt, schwankt der Wert immer weniger, bis er am Zahltag der tatsächlichen Zahlung entspricht.

Mit einer Diskontkurve kann man eine Reihe von Produkten bewerten, zu denen die zukünftigen Zahlungen (der »Zahlungsstrom«) von vorneherein bekannt sind. Nehmen wir als Beispiel ein festverzinsliches Wertpapier zum Nennwert von 100 Euro, das jährlich 4 Prozent Zinsen abwirft und nach 10 Jahren zurückgezahlt wird. Der heutige Wert P dieses Wertpapiers beträgt dann $P = 4f(1) + \ldots + 4f(10) + 100f(10)$. Zu verschiedenen Diskontkurven ergeben sich unterschiedliche Preise P.

Umgekehrt kann man aus der Diskontkurve die so genannte Zinsstrukturkurve herleiten: Wenn ich einen Euro für t Jahre anlege, ohne zwischendurch dafür Zinsen zu kassieren, so bekomme ich am Ende der Laufzeit $1/f(t)$ Euro zurück. Rechnet man zum Beispiel mit einem jährlichen Zinseszins, so ist der Zinssatz $r(t)$, für den $f(t) = 1/(1+r(t))^t$ gilt, der Zinssatz für die Laufzeit t (in Jahren).

Glossar

Arbitrage: ein Geschäft, das mit Sicherheit keinen Verlust und mit positiver Wahrscheinlichkeit einen Gewinn abwirft. In einem funktionierenden Markt sollten Arbitrage-Möglichkeiten nicht oder nur für sehr kurze Zeit existieren.

Derivat: ein Finanzinstrument, dessen Wert von der Entwicklung eines Grundwertes abhängt. Beispiele sind Optionen, Futures und Swaps auf Grundwerte wie Aktien, Rohstoffe und Wertpapiere.

EURIBOR (Euro Interbank Offered Rate): täglich um 11 Uhr in Brüssel von der European Bank Federation auf der Basis von etwa 40 Meldungen europäischer Banken festgestellter Zinssatz, zu dem Banken bereit sind, einander Geld in Euro zu leihen. Für Periodenlängen von einem Tag, einem Monat, drei, sechs und zwölf Monaten verfügbar.

Finanzinstrument: alles, was man bei einer Bank oder Börse kaufen oder an Verträgen mit einer Bank abschließen kann: vom gewöhnlichen Sparbuch über Girokonten, Fondsanlagen, Wertpapiere aller Art und Turbo-Optionsscheine bis hin zu Kreditderivaten.

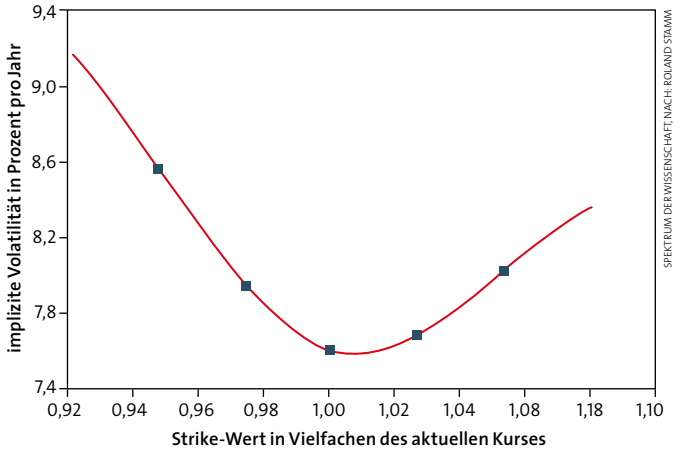
Fixing: die täglich veröffentlichte Schätzung (wörtlich: »Festlegung«) des marktgerechten Zinssatzes, berechnet durch Mittelung aus Meldungen großer Marktteilnehmer, oder auch dieser Schätzwert selbst. Variabel verzinste Instrumente sind in aller Regel an diesen Wert gekoppelt. Bedeutende Werte dieser Art sind LIBOR und EURIBOR.

Forward-Darlehen: ein Darlehen, das zu einem zukünftigen Zeitpunkt ausgezahlt wird, dessen Zinssatz aber bereits heute festgelegt wird.

LIBOR (London Interbank Offered Rate): das Pendant zum EURIBOR für Währungen wie US-Dollar, britisches Pfund und japanischer Yen; wird täglich um 11 Uhr Londoner Zeit von der British Bankers' Association festgestellt.

Periodenlänge: der vorab festgelegte zeitliche Abstand zwischen zwei regelmäßigen Zinszahlungen.

Swap: ein Derivat, bei dem zwei Zahlungsströme gegeneinander getauscht werden. Beim **Zinsswap** zahlt eine Partei in regelmäßigen Abständen feste Zinsen auf einen vorher festgelegten Betrag und empfängt dafür von der Gegenpartei regelmäßig variable (an LIBOR oder EURIBOR gekoppelte) Zinsen auf denselben Betrag. Beim **Basisswap** zahlen beide Vertragspartner variable Zinsen, aber mit verschiedenen Periodenlängen.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT; NACH: ROLAND STAMM

Der »volatility smile«: Aus dem am 11. September 1996 beobachteten Preis einer Option, in drei Monaten einen gewissen DM-Betrag zu einem vorgegebenen Kurs (»Strike«) in Dollar zu tauschen, errechnen sich für verschiedene Strike-Werte verschiedene Volatilitäten. Nach der Theorie, die der Black-Scholes-Formel zu Grunde liegt, hätte diese Kurve eine horizontale gerade Linie sein müssen.

Die Zinssätze, zu denen auf dem Markt Darlehen angeboten werden, schwanken von Tag zu Tag – zwar nur um einige hundertstel Prozentpunkte, aber solche kleinen Unterschiede können gewaltige Wirkungen haben. Im Prinzip werden diese variablen Zinssätze veröffentlicht (»quotiert«), wenn auch nur für eine spezielle Klasse von Schuldnern: Jeden Bankarbeitstag wird ein Mittelwert aus den Zinssätzen errechnet, zu denen sich Banken untereinander Geld leihen, und als Referenzzinssatz veröffentlicht. Zwei bekannte und bedeutende Referenzzinssätze sind LIBOR und EURIBOR.

Im Gegensatz zu den Referenzzinssätzen werden Diskontkurven nicht quotiert, auch wenn sie wesentlich – aber eben nicht ausschließlich – auf veröffentlichten Zinsen beruhen. Jeder Marktteilnehmer hat sie in der Schublade beziehungsweise in seinem Computer, eine für jede Qualitätsklasse von Schuldnern. Mit Hilfe einer solchen Kurve entscheidet er, welche Geschäfte er abschließt. Dabei können deren Konditionen zuweilen erheblich von den veröffentlichten abweichen. Da derartige Geschäfte üblicherweise am Telefon vereinbart werden und in keiner Statistik auftauchen, ist es zwar plausibel, aber keineswegs sicher, dass der durchschnittliche Zinssatz ungefähr gleich dem quotierten ist. Zu allem Überfluss sind auch quotierte Daten manipulierbar, wie sich erst kürzlich beim »LIBOR-Skandal« herausgestellt hat (Kasten S. 98/99).

Die Erstellung einer Diskontkurve ist ein typisches Interpolationsproblem der Mathematik. Gewisse Punkte der Kurve sind bekannt: Wenn ein marktüblicher Zins für eine Geldanlage auf ein Jahr zwei Prozent beträgt, dann ist, wie oben ausgerechnet, für Schuldner dieser Klasse $f(1)=0{,}98039$. Durch diese bekannten Punkte ist eine Kurve mit »vernünftigen« Eigenschaften zu legen. Insbesondere muss die Kurve monoton fallend sein und soll nirgends einen Knick oder andere Unregelmäßigkeiten aufweisen. Möglicherweise sind diese Eigenschaften sogar wichtiger, als dass die Kurve die beobachteten Preise exakt trifft; die könnten ja auch fehlerbehaftet sein. Damit sucht man nicht mehr eine interpolierende, sondern eine Ausgleichskurve.

Jede Bank leitet ihre eigene Diskontkurve her. Dabei wählt sie die Preisbeobachtungen, aus denen die bekannten Punkte der Kurve werden, und die Interpolations- beziehungsweise Ausgleichsmethode im Allgemeinen nicht genau so wie andere Banken. So kommt es, dass verschiedene Banken auch sehr einfache Produkte häufig unterschiedlich bewerten.

Bis zum Ausbruch der Finanzkrise im Frühjahr 2008 waren diese Unterschiede unbedeutend. Seitdem kommt es jedoch entscheidend darauf an, welche Arten von Geschäften (welche »Finanzinstrumente« oder kurz »Instrumente«) in die Berechnung eingehen. Und nicht nur das; wo früher zur Bewertung sehr einfacher Zinsprodukte – etwa für einen Kreditvertrag mit einem an einen Referenzzinssatz wie LIBOR gekoppelten Zins – eine einzige Kurve ausreichte, braucht man jetzt zwei oder mehr. Dieser Paradigmenwechsel hat erhebliche Auswirkungen auf viele Bereiche einer Bank: den Handel, das Risikomanagement, die Buchhaltung und andere.

Noch schwieriger wird die Bewertung bei Derivaten; das sind Finanzinstrumente, deren Wert von anderen Größen wie etwa Aktienkursen, dem Ölpreis oder Zinsen abhängt. Ein typisches Beispiel ist die eingangs angesprochene klassische Aktienoption. Sondertilgungsrechte bei einem Darlehen sind ebenfalls Optionen. Sie haben für den Inhaber der Option – den Darlehensnehmer – einen Wert, den dieser seinem Geschäftspartner erstatten muss. Während der Erwerber einer Aktienoption deren Preis direkt bei Abschluss des Geschäfts zu entrichten hat, pflegt ein Darlehensnehmer ihn in Form eines erhöhten Zinssatzes und damit über die Laufzeit des Kredits verteilt zu zahlen. Auch ein Termingeschäft, bei dem sich beide Parteien verpflichten, ein Gut (Aktien, Rohstoffe, Darlehen, Wertpapiere) zu einem festgelegten Preis an einem zukünftigen Tag zu handeln, ist ein Derivat, da sein Wert bis zum Handelstermin vom Preis des Gutes abhängt.

Einfache Zinsderivate

Ein häufig vorkommendes Termingeschäft aus dem Bereich der Zinsprodukte ist das Forward-Darlehen. Dabei vereinbaren eine Bank und ein Darlehensnehmer verbindlich ein Darlehen in der Zukunft, zum Beispiel in einem Jahr, zu heute festgelegten Zinskonditionen. Damit kann sich der Darlehensnehmer gegen das Risiko steigender Zinsen absichern, weswegen Forward-Darlehen vor allem in Zeiten niedriger Zinsen sehr gefragt sind. Steigen die Zinsen tatsächlich, gewinnt der Darlehensnehmer in Form von gesparten Zinsen; sinken sie dagegen, so muss er mehr zahlen, als wenn er den Vertrag nicht abgeschlossen hätte.

Aller Voraussicht nach wird die Bank dabei aber weder Verlust noch Gewinn machen, da sie sich bereits bei Abschluss des Forward-Darlehens gegen das Risiko einer Zinsveränderung mit einem entsprechenden Gegengeschäft bei einer anderen Bank absichert. Am Ende einer solchen Absi-

cherungskette steht entweder eine Investmentbank, die bereit ist, die entsprechenden Zinsrisiken auf die Bücher zu nehmen und aktiv zu managen, oder ein risikofreudiger Investor wie zum Beispiel ein Hedgefonds.

Während Schuldner und Investoren wegen der Planungssicherheit feste Zinsen haben wollen, sind genau diese Produkte für die Banken problematisch. Ihr Wert schwankt nämlich mit dem allgemeinen Zinsniveau, und zwar gegenläufig. Wenn zum Beispiel eine Bank Bundesanleihen mit einer festen Verzinsung von 3 Prozent besitzt, das allgemeine Zinsniveau aber bei 4 Prozent liegt, würde jeder Käufer dieses Wertpapiers einen Zinsverlust von einem Prozentpunkt über die Restlaufzeit erleiden. Er kauft es der Bank daher nur ab, wenn sie ihn durch einen entsprechend niedrigeren Preis für diesen Verlust entschädigt. Also muss die Bank es mit diesem verminderten Wert in der Bilanz oder zumindest als so genannte Stille Last aufführen.

Auch ein festverzinsliches Darlehen schwankt im Wert. Für den privaten Häuslebauer hat das zunächst keine Konsequenzen, weil er mit seinem Kredit ohnehin keinen Handel treiben kann. Ihm bleibt nur, sich zu ärgern, wenn er das eigene Darlehen noch zu 5 Prozent bedienen muss, während überall welche zu unter 3 Prozent angeboten werden. Auch die Vorfälligkeitsentschädigung, die ein Schuldner bei vorzeitiger Kündigung eines festverzinslichen Darlehens zu entrichten hat, hängt vom allgemeinen Zinsniveau ab.

Man kann sich das Zinsniveau wie einen Wasserpegel vorstellen: Festverzinsliche Produkte sind bei einem bestimmten Wert festgehalten und können daher unter Wasser stehen oder auf dem Trockenen liegen. Variabel verzinste Produkte dagegen schwimmen wie ein Korken mit dem Pegel auf und ab. Ein risikoloses Darlehen, das stets den »fairen«, das heißt marktüblichen Zinssatz zahlt, hat per definitionem stets seinen Nennwert als Wert. Das gilt für ein Darlehen, das alle drei Monate auf den Referenzzinssatz angepasst wird, exakt zu den Fixing-Terminen und zwischendurch zumindest näherungsweise. Im Effekt ist für eine Bank – entgegen der Intuition – ein Produkt, dessen zukünftige Zinsen sie nicht kennt, da sie an die Zinsen von morgen gekoppelt sind, weniger riskant als eines, dessen Zinsen bis zum Laufzeitende festgelegt sind.

Das Risiko aus dem Geld, das die Bank zu einem festen Zinssatz herausgibt, zum Beispiel indem sie ein Darlehen vergibt oder festverzinsliche Wertpapiere kauft, kann sie dadurch kompensieren, dass sie sich Geld zu einem festen Zinssatz ausleiht, etwa indem sie Pfandbriefe ausgibt. Das wird jedoch nie vollständig passend gelingen. Es bleibt ein Nettozahlungsstrom zu festem Zinssatz. Um sich des zugehörigen Risikos zu entledigen, schließt die Bank mit einer anderen Bank ein Zinstauschgeschäft ab, einen so genannten Swap.

Theoretisch verleiht dabei Bank *A* beispielsweise eine Million Euro an Bank *B* zu einem fest vereinbarten Zinssatz; gleichzeitig verleiht *B* an *A* eine Million Euro zu einem variablen Zinssatz. Der Idee nach ist letzterer zu jeder Zeit gleich dem marktüblichen Zins. Da dieser aber eine theoretische und nicht ohne Weiteres bestimmbare Größe ist, einigt man

Der LIBOR-Skandal

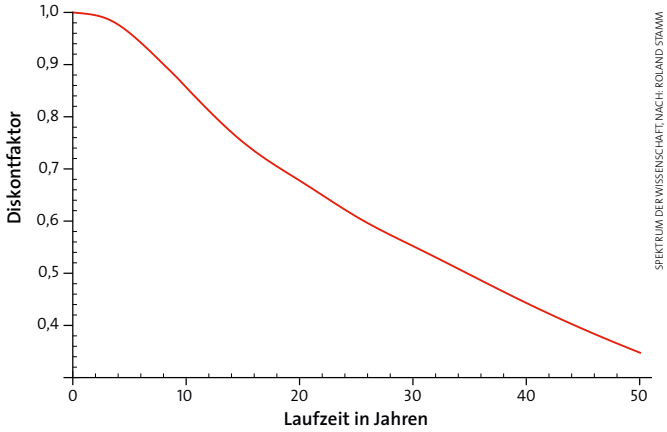
Seit einigen Monaten hat sich ein bis dahin kaum bekanntes Akronym seinen Weg ins Bewusstsein vieler Zeitungsleser gebahnt: Der LIBOR (London Interbank Offered Rate), Oberbegriff für Referenzzinssätze für Zinsgeschäfte mit einem weltweiten Volumen von Hunderten von Billionen Dollar, wurde offensichtlich jahrelang von mehreren Banken manipuliert. Wie konnte das passieren? Und wie profitierten die Banken von der Manipulation?

Der englische Bankenverband BBA berechnet seit 1986 Referenzzinssätze zu vielen wichtigen Währungen und zu Laufzeiten von einer und zwei Wochen, von einem bis zwölf Monaten sowie Übernachtgeschäften. Die Werte werden an jedem Bankarbeitstag um 11 Uhr Londoner Ortszeit bestimmt und auf der Stelle veröffentlicht (»Fixing«).

An dem Verfahren nehmen mindestens sechs und höchstens 18 Banken teil; die Zahl schwankt, da nicht alle Banken in allen Währungsräumen Geschäfte abwickeln. Jede teilnehmende Bank meldet bis zum Stichzeitpunkt 11 Uhr zu jeder Währungs-Laufzeit-Kombination, zu welchem Zinssatz sie glaubt, von anderen Banken Geld geliehen zu bekommen. Die gemeldete Zahl basiert also nicht auf den tatsächlich an diesem Vormittag durchgeführten Transaktionen, sondern auf dem Gutdünken der Teilnehmer. Die gemeldeten Werte werden nach Größe angeordnet, und das obere und das untere Viertel werden ignoriert. (Falls die Zahl der Teilnehmer nicht durch vier teilbar ist, wird die nächstkleinere Anzahl an Werten gestrichen). Der Durchschnitt der restlichen, mittleren Werte ist der gesuchte LIBOR-Zinssatz.

Eine Bank allein kann also keine drastischen Bewegungen verursachen, da einzelne Extremwerte verworfen werden. Wenn sich aber mehrere Banken absprechen, können sie durchaus das Fixing beeinflussen. Dies ist offenkundig in der Vergangenheit geschehen. Die britische Barclays Bank hat bereits zugegeben, an einem solchen Kartell beteiligt gewesen zu sein, und dafür in einem Vergleich 500 Millionen Dollar an die britische und amerikanische Finanzaufsicht gezahlt. Die Deutsche Bank hat Kronzeugenstatus bei der EU-Kommission und in der Schweiz bekommen, betont aber, dass dies kein Schuldeingeständnis sei. Unter den etwa einem Dutzend mutmaßlich beteiligten Banken sind große Namen wie JPMorgan, Société Générale und HSBC.

Wie kann eine Bank von einer solchen Manipulation profitieren? Die Darlehensverträge und deren Derivate, die direkt oder indirekt an den LIBOR gekoppelt sind, haben ein Volumen in der Grö-



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: ROLAND STAMM

Die Euro-Diskontkurve für besicherte Derivate vom 20. Juni 2012. Die Gestalt der Kurve ändert sich geringfügig von Tag zu Tag, aber sie beginnt stets bei dem Wert 1 (ein Euro, der mir heute ausgezahlt wird, ist heute einen Euro wert) und ist monoton fallend (es ist immer besser, sein Geld früher als später wiederzubekommen).

sich ersatzweise darauf, dass der variable Zinssatz zu vereinbarten Stichtagen, typischerweise alle drei Monate, auf einen Referenzzinssatz wie LIBOR oder EURIBOR neu festgelegt wird. Tatsächlich fließt die Million weder von *A* zu *B* noch umgekehrt, also muss auch keine der Banken um dieses Geld fürchten. In diesem Sinn ist das Geschäft risikolos. Der Zahlungsstrom besteht nur aus der Differenz der Zinszahlungen.

Damit diese Bedingung erfüllt ist, muss das gesamte Geschäft, das heißt, das eine fiktive Darlehen minus das andere, bei Vertragsabschluss den Wert null haben. Abweichungen von der fairen Swaprate auf der festen Seite pflegen die Beteiligten auszugleichen, indem sie bei Vertragsabschluss einen festen Zu- beziehungsweise Abschlag (den »Spread«) auf den Referenzzinssatz vereinbaren.

Ein Beispiel mit Zahlenwerten vom 27. September 2012: Die zehnjährige Swaprate für feste Zinsen gegen 6-Monats-EURIBOR beträgt 1,746 Prozent. Das heißt, wenn ich zehn Jahre lang jährlich diese Rate zahle und dafür halbjährlich EURIBOR empfange, hat das aus heutiger Sicht für mich den Wert null. Wenn ich ein festverzinsliches Papier mit dieser Laufzeit, aber mit 2 Prozent Verzinsung, gegen ein variables mit 6-Monats-EURIBOR tauschen will, werde ich auf diese variablen Zinsen einen Spread in Höhe der Differenz von 0,254 Prozent verlangen (und bezahlt bekommen).

Die 6-Monats-EURIBOR-Rate vom gleichen Tag beträgt übrigens 0,446 Prozent. In die höhere Swaprate ist eben die Erwartung eingegangen, dass die zukünftigen Zinsen und damit auch die EURIBOR-Fixings deutlich höher liegen werden als heute. Die Swaprate ist eine Art Mittelwert der erwarteten zukünftigen EURIBOR-Fixings.

Eine andere Art von Swap ist der Basisswap. Dabei zahlen beide Parteien auf einen festgelegten Nennwert variable Zinsen, aber mit verschiedenen Zahlungsperioden. Zum Beispiel zahlt Bank *A* den 3-Monats-EURIBOR alle 3 Monate, während Bank *B* halbjährlich den 6-Monats-EURIBOR zahlt.

ßenordnung von 600 Billionen Dollar; ein hundertstel Prozentpunkt Unterschied im Jahreszins macht dann 60 Milliarden Dollar pro Jahr aus. Typischerweise wird zu vorab festgelegten Stichtagen der Zinssatz eines lang laufenden Darlehens an den dann gültigen LIBOR-Wert angepasst. Daher ist es für die Bank günstig, den LIBOR an einem Tag nach oben zu manipulieren, an dem ein großes Volumen von ihr ausgegebener Darlehen (minus den von ihr zu bedienenden Krediten) zur Anpassung (zum »Fixing«) ansteht. Am nächsten Tag kann entsprechend eine Manipulation nach unten vorteilhaft sein. Einzelnen Händlern ist es angeblich gelungen, den Gewinn ihrer Bank durch Verschieben des LIBOR um einen Basispunkt oder 0,01 Prozentpunkte an einem einzigen Tag um zwei Millionen Euro zu erhöhen.

Offensichtlich war diese Gewinnsteigerung vor Ausbruch der Finanzkrise das Hauptmotiv zur Manipulation. Danach bestimmte eine andere Sichtweise das Handeln der Banken: Die Höhe des von einer Bank zu zahlenden Zinssatzes im Vergleich zum Durchschnitt lässt Schlussfolgerungen auf ihre vom Markt wahrgenommene Kreditqualität zu. Nach Ausbruch der Krise Anfang 2008 hatten die Banken deshalb ein großes Interesse daran, ihre Refinanzierungskosten möglichst rosig darzustellen und dadurch der Schein der Solidität aufrechtzuerhalten. So wurden ab 2008 vor allem zu niedrige Zinsen an die BBA gemeldet. Der ehemalige Chef der Barclays Bank, Bob Diamond, behauptet sogar, dass die Bank of England ihn mehr oder weniger deutlich dazu aufgefordert habe.

Auf die verdächtigten Banken kommen Schadenersatzforderungen zu, die nach Einschätzung von Analysten zweistellige Milliardenbeträge erreichen könnten.

Neben der Frage nach der Bestrafung der Missetäter diskutiert man, wie die LIBOR-Feststellung manipulationsfest zu machen wäre. Da der Geldmarkt aber recht intransparent ist, weil alle Geschäfte nur zwischen den beiden jeweils beteiligten Banken abgesprochen werden, können nur die Banken selbst wissen, zu welchen Zinsen sie tatsächlich Geld geliehen bekommen. Eine Vergrößerung der Anzahl der teilnehmenden Banken allein wird das System wahrscheinlich nicht robuster machen: Die für den Euro relevanten Zinssätze – genannt Euro Interbank Offered Rate oder EURIBOR – basieren auf den Meldungen von 43 Banken, aber auch beim EURIBOR wird wegen des Verdachts auf Manipulationen ermittelt.

Damit können Banken die Fristen ihrer Zinszahlungen von einer Frequenz auf eine andere umstellen. So wird eine Bank, die ein variabel verzinstes Darlehen mit halbjährlichen Zahlungen vergibt, sich selbst aber mit vierteljährlichen Zahlungen refinanziert, ihre Zinseinkünfte aus dem Darlehen mit einem Basisswap von 6 auf 3 Monate transformieren wollen.

Der Swapmarkt ist sehr liquide. Es gibt viele Marktteilnehmer mit unterschiedlichen Interessen und Erwartungen, die jederzeit Zinstauschgeschäfte der einen oder anderen Art anbieten: variabel gegen fest oder umgekehrt. Man findet daher stets einen passenden Swap.

Bewertungen vor der Krise

Wie berechnet man nun den Preis eines Derivats, zum Beispiel eines Forward-Darlehens? Der einfachste Fall ist ein Forward Rate Agreement (FRA). Dabei einigen sich die Parteien bereits heute auf einen Zinssatz K für ein Darlehen, das erst in der Zukunft ausgezahlt wird. Nehmen wir an, A will sich in sechs Monaten einen Euro von B leihen und ihn drei Monate später mit Zinsen zurückzahlen. (Alles, was wir im Folgenden berechnen, ist proportional zur Kreditsumme. Also schadet es nicht – und vereinfacht das Rechnen –, wenn wir einen Kredit in der absurden Höhe von einem Euro betrachten.) Was ist ein fairer Wert für K?

Solche Fragen pflegt man durch ein so genanntes Replikationsargument zu beantworten. Man »repliziert die Zahlungsströme«, das heißt, man findet einen Satz von einfacheren Geschäften (ein »Portfolio«), die zusammen dieselben Zahlungsströme erzeugen wie das in Frage stehende Geschäft. Das replizierende Portfolio hat also in neun Monaten denselben Wert wie das ursprüngliche. Dann, so das übliche Argument, muss es bereits heute denselben Wert haben. Wäre dem nicht so, dann könnte jemand »Arbitrage« betreiben, das heißt, das eine Geschäft in der Rolle von A, das andere in der Rolle von B abschließen und dabei risikolos und ohne Einsatz eigenen Geldes Gewinn machen. Wenn das möglich wäre, dann wäre bestimmt schon jemand anders auf die Idee gekommen und hätte durch seine Nachfrage nach den entsprechenden Geschäften die Preise so verändert, dass der Arbitragegewinn auf null zusammenschrumpft.

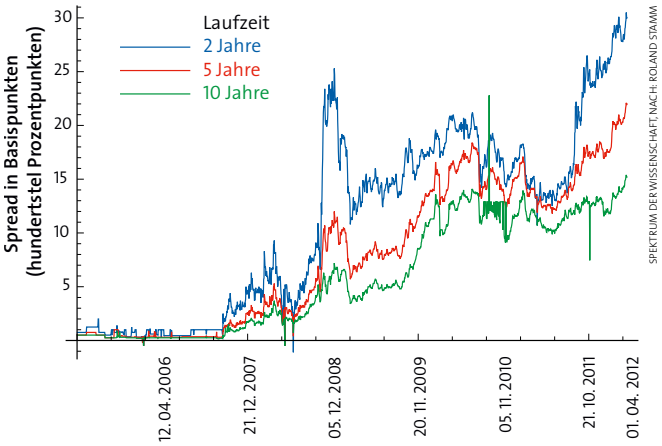
Die Zahlungsströme unseres Beispiel-FRAs sind

- 1 Euro von B an A in sechs Monaten,
- $1+K/4$ Euro von A an B in neun Monaten.

(Zinssätze werden stets auf ein Jahr bezogen angegeben; für einen Anlagezeitraum von drei Monaten sind also Zinsen in Höhe von $K/4$ mal dem Kreditbetrag fällig.) Wir nehmen nun zusätzlich an, dass ein Marktteilnehmer Geld zum risikolosen Zinssatz anlegen und ausleihen kann. Dann kann A seine Zahlungsströme replizieren, indem er heute

- $f(0{,}75)(1+K/4)$ Euro für neun Monate ausleiht, wofür er in neun Monaten $1+K/4$ Euro zurückzahlen muss;
- $f(0{,}5)$ Euro für ein halbes Jahr anlegt, wofür er in sechs Monaten einen Euro zurückbekommt.

Dabei ist f die Diskontkurve zum risikolosen Zinssatz. Aus der Bedingung, dass heute netto kein Geld fließt, ergibt sich



Mit dem Ausbruch der Finanzkrise musste derjenige, der ein variabel verzinsliches Wertpapier mit Zinsanpassung alle sechs Monate gegen ein gleichartiges mit Zinsanpassung alle drei Monate tauschte, einen Aufschlag (den »Basisspread«) auf die replizierte Rate zahlen. Dieser ist ein indirektes Maß dafür, wie groß der Markt das Risiko einer Bankpleite oder einer allgemeinen Liquiditätsklemme einschätzt. Offensichtlich hält der Markt nach einer gewissen Beruhigung dieses Risiko 2012 für so hoch wie auf dem Höhepunkt der Krise oder sogar für noch höher.

für K die Gleichung $f(0{,}75)(1+K/4)-f(0{,}5)=0$ mit der Lösung

$$K=4(f(0{,}5)/f(0{,}75)-1).$$

Das wie in diesem Beispiel definierte K heißt replizierte Forward-Rate. In ihren Wert gehen – über die Diskontkurve f – die Erwartungen des Markts ein. Genauer gesagt stellt sich heraus, dass die replizierte Forward-Rate mathematisch dem Erwartungswert (unter einem geeigneten Wahrscheinlichkeitsmaß) des zukünftigen Zinssatzes entspricht. Sie ist also ein Mittelwert über alle vom Markt für möglich gehaltenen Zinsen für Dreimonatsgeld, wie sie zum Beispiel in den entsprechenden EURIBOR-Fixings dokumentiert sind.

Forward-Raten werden für viele Periodenlängen und Termine quotiert. Vor der Krise waren die replizierten und die quotierten Forward-Raten praktisch identisch und unabhängig von den übrigen Parametern des Geschäfts (im Beispiel die sechs Monate Wartezeit und die drei Monate Laufzeit des Kredits).

Auch einen Basisswap konnte man bis 2007 sehr einfach bewerten: Bei Abschluss und zu jedem gemeinsamen Fixing-Termin war dieser genau null Euro wert, denn ein variabel verzinstes Wertpapier ist zumindest zum Fixing-Termin immer den Nominalbetrag wert. Demnach ist ein Basisswap nichts anderes als der Austausch von zwei variabel verzinsten Wertpapieren, die somit beide gleich viel wert sind, mit verschiedenen Fixing-Perioden. Nur zwischen den Fixing-Terminen kann es zu leichten Kursschwankungen kommen.

Ein normaler Zinsswap war ebenfalls einfach zu bewerten, da man ihn als Tausch eines variabel- gegen ein festverzinsli-

ches Wertpapier auffassen kann. Ersteres ist zum Fixing-Termin immer den Nominalbetrag wert, also muss man nur ein gewöhnliches festverzinsliches Wertpapier durch Abdiskontieren der bekannten Zahlungen bewerten und dann vom Wert den Nennwert abziehen. Auch hier kann es zwischen den Fixings zu Schwankungen kommen, aber diese sind ebenfalls nicht schwierig zu berechnen.

Im Gegensatz zu Aktienoptionen, deren Wert für den Inhaber stets positiv oder allenfalls null ist, können Derivate wie FRAs oder Swaps sowohl einen positiven als auch einen negativen Wert haben, je nachdem, wie sich das Zinsniveau entwickelt. Dieser Wert steht im Risiko: Wenn von zwei Banken *A* und *B*, die ein Derivat miteinander abgeschlossen haben, das Portfolio von *A* einen negativen Wert hat, verliert *B* diesen Wert, wenn *A* ausfällt.

Um dieses Risiko abzudecken, pflegen beide Banken bereits bei Vertragsabschluss eine so genannte Besicherung zu vereinbaren: Der Vertragspartner mit dem jeweils schlechter bewerteten Portfolio – im Beispiel *A* – gibt die Wertdifferenz als Sicherheit (»Collateral«) an den anderen, und zwar in der Regel in Form von Bargeld. Die Differenz wird täglich neu berechnet und das Collateral entsprechend angepasst. Das verbleibende Verlustrisiko ist also auf die Veränderung dieser Wertdifferenz von einem Tag zum anderen beschränkt. Diese Sicherheitslücke kann sich allenfalls auf einige Tage verlängern, bis Dispute über die Bewertung, die gerade bei komplexeren Produkten immer wieder vorkommen, aufgelöst sind.

Kleine Unterschiede, große Auswirkungen

Mit Ausbruch der Krise im Frühjahr 2008 veränderte sich der Markt. So waren bei Basisswaps auf einmal Aufschläge auf der Seite mit den kürzeren Perioden zu zahlen, die so genannten 3-Monats-6-Monats-Basisspreads (Bild links). Die replizierten und die quotierten Forwards stimmten nicht mehr überein (Bild rechts). Mit dem Ausfall von Lehman Brothers erreichte diese Unsicherheit ihren absoluten Höhepunkt. Wenn man bedenkt, dass Ende 2008 weltweit Zinsderivate mit Nennwerten von etwa 403 Billionen ($4{,}03 \cdot 10^{14}$) Dollar ausstanden (dieser Betrag wuchs trotz oder vielleicht auch gerade wegen der Finanzkrise bis Mitte 2010 auf 434 Billionen Dollar), dann kann man ermessen, dass selbst kleine Unterschiede in der Bewertung sehr große Auswirkungen haben können.

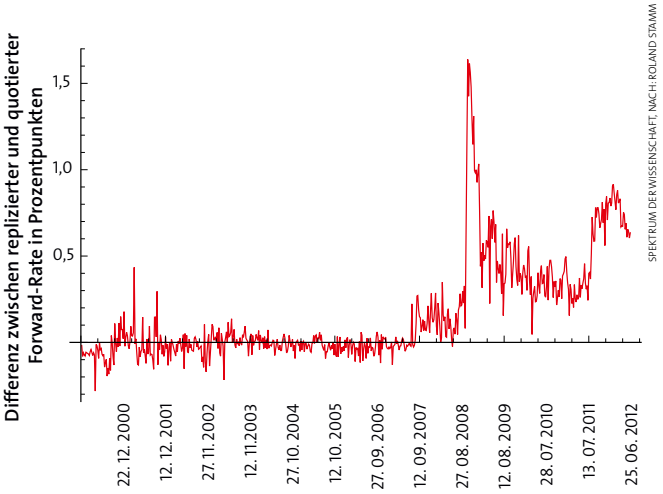
Was vor der Krise nur üblich war, ist inzwischen de facto zum Zwang geworden. Seit dem Zusammenbruch von Lehman Brothers im Herbst 2008 kann eine Bank ohne eine Vereinbarung über Sicherheiten (»Collateral Agreement«) praktisch keine Derivate mehr abschließen.

Das Geld für die Sicherheitszahlung muss sich Bank *A* aus dem obigen Beispiel – gegen Zinszahlung – am Markt beschaffen, während *B* sich Refinanzierungskosten in gleicher Höhe erspart. *B* zahlt zwar an *A* für die Sicherheiten Zinsen in Höhe des Zinssatzes zum nächsten Werktag (die »Overnight Rate«); die sind aber in der Regel deutlich geringer, als wenn sich *B* das Geld am Markt besorgen müsste. Insgesamt läuft das darauf hinaus, dass Bank *A* für die Wertdifferenz, die sie Bank *B* schuldig ist, Kreditzinsen zahlt. Durch diesen Kunstgriff bleibt das Geschäft (fast) risikolos, obgleich im Gegensatz zur Vorkrisenzeit das Risiko einer Bankpleite in die Kalkulation einbezogen ist.

Damit funktioniert jedoch das oben angeführte Replikationsargument nicht mehr. Die Banken haben gelernt, dass selbst sehr gut bewertete Banken, die am LIBOR-Verfahren teilnehmen, pleitegehen können. Also werden Geldmarktgeschäfte zwischen Banken nicht mehr als risikolos angesehen, und die Instrumente, die zur Replikation verwendet wurden – Darlehen und Geldanlage –, passen nicht mehr zum Derivat. Denn bei einem Darlehen muss der Verleiher fürchten, dass er sein Geld nicht wiederbekommt, auch wenn der Darlehensnehmer eine Bank ist; also fordert er einen Risikoaufschlag. Der geht in die replizierte Rate ein, während er für ein Derivat nicht erforderlich ist. Deswegen liegt die replizierte Rate über der quotierten.

Mit demselben Argument kann man auch das Entstehen des Basisspreads erklären. Swaps sind besicherte Derivate, die aber an die EURIBOR-Raten gekoppelt sind. Die jedoch beziehen sich auf echte Darlehensgeschäfte und enthalten daher implizit auch Risikoaufschläge, die mit der Laufzeit ansteigen: In drei Monaten kann weniger Unerwartetes passieren als in sechs, und von einem Tag auf den anderen fast gar nichts. Der Sechsmonatszinssatz ist also typischerweise deutlich höher als der Dreimonatszinssatz. Dafür gibt es aber in einem Swap keinen Grund, denn der ist ja als besichertes Derivat (fast) ausfallsicher. Deswegen muss der Zahler mit der kürzeren Periode den entsprechenden Aufschlag als Ausgleich zahlen (Bild S. 100).

Mit welchen Modellen kann nun die Finanzmathematik die Ereignisse am Markt nachvollziehen? Bisher war es üblich, die Diskontkurve für Banken als Schuldner aus quotier-



So hoch lag der replizierte (durch Abgleich mit einfacheren Geldanlagen gewonnene) Zinssatz für ein Forward Rate Agreement (FRA), das die Zinsen in drei Monaten für drei Monate festlegt, über dem quotierten (veröffentlichten) Zinssatz. Die Unterschiede bis 2007 sind im Wesentlichen Ungenauigkeiten aus den Daten.

ten Derivatpreisen abzuleiten. Das war korrekt, solange ein Darlehen an eine Bank als risikolos und damit einem (risikolosen) Derivat vergleichbar gelten durfte. Das ist seit der Krise nicht mehr der Fall. Vielmehr spricht inzwischen vieles dafür, die Diskontkurve von den Overnight-Raten herzuleiten, also den Zinssätzen, die auch für die oben genannten Sicherheiten gelten. Seit einigen Jahren wird dieses Vorgehen von großen Investmentbanken propagiert und findet zunehmend Anhänger.

Zum Bewerten der eigenen Forderungen muss es nach wie vor (für alle Zahlungen von vergleichbarer Kreditqualität) eine einheitliche Diskontkurve geben; alles andere würde alsbald auf Widersprüche führen. Die taugt aber nicht mehr zum Replizieren der Forward-Raten. Ersatzweise konstruiert man zu jeder Periodenlänge – 1, 3, 6 und 12 Monate – eine eigene Kurve. Diese »Forward-Kurven« sehen zwar aus wie Diskontkurven, sind aber zum Diskontieren nicht brauchbar. Vielmehr sind sie abstrakte Rechenhilfsmittel. Man leitet sie aus Instrumenten der zugehörigen Periodenlänge her, und zwar so, dass die mit Forward-Kurven anstelle der Diskontkurven replizierten Forward-Raten genau gleich den quotierten sind. Und man nutzt sie, um daraus zukünftige Zinssätze und damit EURIBOR-Fixings zu prognostizieren, was mit der Diskontkurve nicht mehr gelingt.

Damit gibt man nicht nur das Prinzip »eine Kurve pro Währung« auf; das Leben wird insgesamt komplizierter. Schon für die Bewertung eines Basisswaps benötigt man statt einer einzigen bis zu drei verschiedene Kurven – oder noch mehr, wenn zusätzlich fremde Währungen involviert sind. Waren bisher die Marktrisiken eines Finanzprodukts nur durch Veränderungen auf einer Kurve gegeben, so muss man nun mehrere Kurven gleichzeitig im Auge behalten und zusätzlich deren statistische Korrelationen untereinander bestimmen. Das erhöht die Anforderungen an das Risikomanagement und im Allgemeinen auch die Kosten, sich gegen diese Risiken abzusichern.

Das gilt noch viel stärker für kompliziertere Produkte, die nur mit stochastischen Modellen bewertet werden können, da sich auf einmal die Zahl der zu bestimmenden Parameter erheblich erhöht. Dies ist insbesondere bei Geschäften der Fall, die sich auf zwei oder mehr Währungen beziehen. Die akademische Gemeinschaft steht hier gerade erst am Anfang der Forschung.

Für einen Finanzmathematiker noch viel erstaunlicher ist die Tatsache, dass seit dem Zusammenbruch von Lehman Brothers die Märkte die Bedingung, dass es keine Arbitrage geben kann, nicht mehr zu beachten scheinen, insbesondere, wenn Derivate im Spiel sind. Der Grund ist wohl wie bei den oben besprochenen Änderungen, dass zum einen die Kreditwürdigkeit selbst exzellent beurteilter Schuldner wie der USA oder Deutschlands wegen der steigenden Neuverschuldung in Zweifel gezogen wird und zum anderen die erwarteten Refinanzierungskosten von Sicherheiten eine Rolle spielen. So verlangen mittlerweile Investmentbanken für ein und dasselbe Derivat unterschiedliche Preise je nachdem, welchen Status der Kontrahent hat und in welcher Währung Sicherheiten hinterlegt werden.

Wenn der Markt aber Arbitrage-Möglichkeiten erlaubte, bräche für die Quants (»Quantitative Analysts«) – die Finanzmathematiker, die sich mit der Bewertung von Finanzprodukten beschäftigen – eine Welt zusammen. Denn das würde bedeuten, dass Finanzprodukte keinen eindeutigen Preis mehr haben. Vielleicht gibt es die scheinbaren Arbitrage-Möglichkeiten ja auch gar nicht, da in der Theorie die entsprechenden Kosten und Risiken noch nicht oder nur unzureichend berücksichtigt werden. In jedem Fall ist noch ein langer Weg zurückzulegen, bis die Theorie wieder mit dem Marktgeschehen in Einklang gebracht werden kann.

Eine weitere Quelle neuer Komplikationen ist eine Bewertungskomponente, die Credit Value Adjustment (CVA) genannt wird. Das CVA beschreibt den Erwartungswert des Verlusts, den der Ausfall eines Derivatkontrahenten verursacht. Selbst besicherte Derivate sind nämlich, wie oben schon bemerkt, nicht vollkommen ohne Kreditrisiko. Dieses Restrisiko misst eben das CVA. Für Derivate einer Bank mit Kunden, die keine Sicherheiten stellen, ist das Risiko und damit das CVA natürlich noch größer.

Die Kreditwürdigkeit und die damit verbundenen Refinanzierungskosten beeinflussen inzwischen wesentlich die Bewertung von Finanzinstrumenten. Damit musste sich der Markt von der früheren einheitlichen Bewertung verabschieden. Und wie beim Smile von 1987 ist davon auszugehen, dass auch kein Weg dorthin zurückführen wird.

DER AUTOR

Roland Stamm hat in Mainz Mathematik studiert und in Münster über Algebraische Topologie promoviert. Er ist bei der Deutschen Pfandbriefbank in Eschborn für Risikomethodik und die Bewertung komplexer Finanzprodukte zuständig.

QUELLEN

Bianchetti, M.: Two Curves, One Price: Pricing & Hedging Interest Rate Derivatives Decoupling Forwarding and Discounting Yield Curves. November 2008. http://ssrn.com/abstract=1334356

Kenyon, C., Stamm, R.: Discounting, LIBOR, CVA and Funding. Palgrave Macmillan, London 2012

Mercurio, F.: Interest Rates and the Credit Crunch: New Formulas and Market Models. März 2009. http://papers.ssrn.com/abstract_id=1332205

Tuckman, B., Hom, J.-B.: Consistent Pricing of FX Forwards, Cross-Currency Basis Swaps and Interest Rate Swaps in Several Currencies. Lehman Brothers Report, September 2003

Whittall, C.: The Price is Wrong. In: RISK magazine, 5. März 2010. Nur online: www.risk.net/risk-magazine/feature/1594823/the-price-wrong

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1165739**

Sie möchten noch mehr WISSEN?

Erleben Sie ZEIT WISSEN, das intelligente Wissenschaftsmagazin!
Lesen Sie Neues und Spannendes über Wissenschaft, Technik, Umwelt und Gesundheit:
faszinierend, lebendig und lebensnah.

Der Einfluss von Sprache auf das Denken

Wenn Unternehmer für die Forschung stiften

Dossier: Synthetische Biologie

Tiere in der deutschen Wildnis

Jetzt im Handel, mehr Informationen auch unter:
www.zeit-wissen.de oder per Tel. 0180/52 52 909

(14 Cent/Min. aus dem deutschen Festnetz, max. 42 Cent/Min. aus dem Mobilfunknetz)

ZEIT WISSEN

David Graeber
Schulden
Die ersten 5000 Jahre
Aus dem Englischen von
Ursel Schäfer, Hans Freundl und Stephan Gebauer.
Klett-Cotta, Stuttgart 2012. 600 S., € 26,95

WELTWIRTSCHAFT

»Schulden braucht man nicht zurückzuzahlen!«

Der Anthropologe und Anarchist David Graeber erklärt die Welt neu und bekämpft das Dogma der Zahlungsmoral.

Es kommt wie gerufen: ein Buch, das einem erklärt, warum es vielleicht keine moralische Pflicht sein muss, Schulden immer zurückzuzahlen. In Zeiten der Dauerfinanzkrise, in denen Zockerschulden übergroßer Banken gerne sozialisiert werden, mag das für manchen, der sich in den Klauen von Baukrediten und Zinslasten gefangen sieht, ein verlockender Gedanke sein.

Prophet der Frohbotschaft ist David Graeber, selbst ernannter Anarchist und Motor der weltweiten Occupy-Bewegung. Sein Buch liest sich über weite Strecken wie ein Krimi, was den Inhalten nur zugutekommt. Und seine These gibt zu denken: Die stillschweigende Gleichsetzung von »Schuld« im Sinn einer moralischen Verpflichtung mit der rein ökonomischen Pflicht, geliehenes Geld zurückzuerstatten, muss nicht immer gelten. »Die Dehnbarkeit des Begriffs ist zugleich die Grundlage seiner Macht«, sagt der Forscher.

Das Beispiel liefert der Anthropologieprofessor am Goldsmith College in London aus persönlicher Erfahrung. Als er einmal zwei Jahre im Hochland von Madagaskar verbrachte, hatte es dort kurz zuvor den ersten heftigen Malariaausbruch nach zwei Generationen der Ruhe gegeben. 10 000 Menschen starben, da inzwischen kaum noch einer von ihnen immun gegen die Seuche war. Das jahrelang betriebene Programm zur regelmäßigen Überwachung und Vernichtung der Moskitos hatte die Regierung gestrichen, da sie einem Sparprogramm des Internationalen Währungsfonds IWF unterstand.

»Es ging nicht um viel Geld«, erinnert sich Graeber. »Nur damit die Citibank keinen unverantwortlichen Kredit abschreiben muss, der in der Bilanz sowieso nicht groß ins Gewicht fällt.« Kein Wunder, dass er seitdem den IWF massiv kritisiert. Der sei »in der Hochfinanz das Äquivalent zu den Jungs, die kommen und einem die Beine brechen«, wenn man seine Schulden nicht zurückzahle. Um ihre Schulden zu bedienen, sähen sich manche Staaten gezwungen, Leistungen wie die Subventionierung von Grundnahrungsmitteln zu streichen.

Das ist erschütternd und stützt natürlich die alte Forderung vom Schuldenverzicht bei den ärmsten der Entwicklungsländer. Aber Graeber holt viel weiter aus und stellt das Schuldenthema in den gesamtzivilisatorischen Zusammenhang. Auf über 400 Seiten zeigt er, wie Kredite von Anfang an – Geschichte des alten Mesopotamien, antiker Sklavenmärkte und Schuldkerker – die Entwicklung von Gesellschaften vorantrieben.

Seine These: Wir haben die Neigung, alle menschlichen Beziehungen auf Tausch zu reduzieren, so als könnten wir »unsere Verbindungen zur Gesellschaft oder sogar zum Kosmos in denselben Begriffen fassen wie ein Geschäft«. Und so sieht Graeber generell Tauschgeschäfte »als eine Folge von Gewalt«, mit der die Ansprüche durchgesetzt werden können. So, wie es für Schuld die Synonyme »Sünde« oder »Verfehlung« gebe, habe der Schuldner immer etwas von einem Kriminellen. Jede Form der Verpflichtung würde »durch Verbrechen und Vergeltung« aufrechterhalten – als Antrieb für Kriege, Sklaverei, Ehre, Schuld und Sühne. Das mag zwar ein arg pessimistisches Licht auf die Evolution von Gesellschaft und Zivilisation generell werfen, aber es ist schwer, sich dem Sog seiner Argumente zu entziehen.

Wer jedoch nicht durch die ganze Geschichte antiker Kulturen und des Mittelalters ziehen will und eher nach einer Analyse der gegenwärtigen Finanzkrise sucht, wird erst am Ende des Buchs bedient. Immerhin benennt Graeber dort ihre Ursache: die Entkopplung des Dollars vom Goldstandard. Erst dieser Schritt, der 1971 für Nixon womöglich wegen der Unsummen für den Vietnamkrieg unvermeidlich gewesen sei, habe die Real- und die virtuelle Geldwirtschaft katastrophenträchtig auseinandergetrieben.

Den großen Crash des Jahres 2008 sieht er als einen »Betrug«, bei dem die Krise schon mit der Gewissheit geplant war, »dass die Opfer am Ende gezwungen sein würden, die Täter zu retten«. Der Staat behandelte das imaginäre Geld der Investment-Banker, als wäre es real. Den Bankern wurde geholfen, aber verschuldete Hausbesitzer mussten ihr Heim verlassen.

Am Ende packt Graeber richtig aus und spart nicht mit Appellen und Beschimpfungen, so plausibel sie auch klingen mögen. Der heilige Grundsatz, dass Schulden zurückgezahlt werden müssten, sei nur »eine schamlose Lüge«. Keineswegs müsse »jeder« alles zurückzahlen. Das müssten nur einige von uns. Und so seien Schulden nichts »als eine Perversion eines Versprechens, das von Mathematik und Gewalt verfälscht wurde«. Der Occupy-Aktivist fordert folgerichtig nichts weniger als den Umsturz: »Wir sollten alle reinen Tisch machen, unsere überkommene Moral über

den Haufen werfen und einen Neuanfang wagen.«

In dieser Plattheit wird das kaum jemanden dazu veranlassen, aktiv etwa gegen die herrschende Marktwirtschaft zu Felde zu ziehen – selbst Graebers Occupy-Bewegung verödet inzwischen mangels erkennbarer Ziele. Statt konkreter Vorschläge empfiehlt der Anthropologe einen generellen Schuldenerlass – sowohl für Staats- als auch für Konsumschulden. Aber nicht etwa als Reformprogramm, sondern weil es halt zeige, dass Schuldentilgung »nicht das Wesen der Sittlichkeit« darstelle.

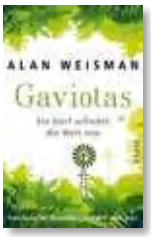
Zweifellos ist dem Autor Recht in seiner Grundthese zu geben, wenn er die generelle Moralisierung von Schulden als verderblich ansieht. Was daraus folgt, wird aber auch am Ende dieses Buchs nicht so recht klar.

Sieht man von den schon traditionellen Untergangsszenarien für den Kapitalismus mal ab, so liegt die zerstörerische Wirkung der »gewaltigen Schuldenmaschine« schließlich auf der Hand. Doch dann geht Graeber die Luft aus. Schließlich verlangt er nur noch kleinlaut, diese Maschine »ein wenig zu drosseln« – wegen dieser Quintessenz braucht man das Buch eigentlich nicht zu lesen.

Aber selbst wenn der Durchmarsch durch Jahrtausende der Menschheitsgeschichte nicht immer gleichermaßen fesselt, so liefert David Graeber doch einen originellen Blick auf die Entwicklung der Zivilisation, wie ich ihn bisher noch nicht gelesen habe.

Reinhard Breuer

Der Rezensent ist Editor-at-large von »Spektrum der Wissenschaft«. Er hat zwar Schulden, sieht aber keine Möglichkeit, sie nicht zurückzuzahlen.



Alan Weisman

Gaviotas

Ein Dorf erfindet die Welt neu

Aus dem Englischen von Ursula Pesch.

Piper, München 2012. 379 S., € 19,99

ALTERNATIVES LEBEN

Von einem, der auszog, die Welt zu retten

Seit den 1970er Jahren zieht es die besten Ingenieure, Techniker und Naturwissenschaftler an den unwegsamen Ort Gaviotas, um dort zu forschen, zu arbeiten und dauerhaft mit ihren Familien zu leben.

Der Kolumbianer Paolo Lugari hatte Anfang der 1970er Jahre eine Vision: Er wollte am unwirtlichsten, unfruchtbarsten Ort der Erde ein Dorf gründen, in dem es den Menschen an nichts fehlte. Wenn das gelänge, so Lugari, würde es überall möglich sein, und der explosionsartig anwachsenden Menschheit würde der Platz auf der Erde nicht knapp werden.

Knapp 30 Jahre später reiste der bekannte Journalist Alan Weisman, Autor des internationalen Bestsellers »Die Welt ohne uns«, selbst in das kleine kolumbianische Dorf Gaviotas und schrieb daraufhin das Buch, das uns dessen unglaubliche Geschichte erzählt.

Östlich der kolumbianischen Anden erstreckt sich eine ausgedörrte Graslandschaft, die etwa die Hälfte der Fläche Deutschlands einnimmt: »los llanos« . Dürreperioden wechseln sich mit monatelangem Regen ab, der den nährstoffarmen Boden in eine Schlammwüste verwandelt. Buschfeuer brennen die Vegetation fast schneller nieder, als sie nachwachsen kann. Lange Zeit waren deshalb die nomadischen Guahibo-Indianer die einzigen Menschen, die in dieser Gegend lebten. In jüngerer Zeit flohen etliche Menschen vor dem Drogenkrieg in die Llanos, konnten dort aber – bei der Alternative Wohnen am Fluss mit unzähligen Malariamücken oder kilometerweiter Weg zum Trinkwasser – nie recht heimisch werden.

Anfangs glaubte daher außer Lugari kaum jemand an das Projekt. Aber mit seinen Überzeugungskünsten und guten akademischen Beziehungen lockte er innerhalb kurzer Zeit viele wissensdurstige Studenten in das kleine Dorf im Niemandsland. Sie erforschten die Natur, die einheimische Tier- und Pflanzenwelt und fanden kreative Möglichkeiten, sich der Umgebung anzupassen und sie für sich nutzbar zu machen. Von den Guahibo lernten sie, wie man die eingeweichten Blätter der Buritipalme zu Netzen und Hängematten verarbeitet und aus dem Palmöl ein dem Olivenöl gleichwertiges Speisefett herstellt.

Der Anspruch der Wissenschaftler war es, nachhaltig zu wirtschaften und zu bauen. Zumindest langfristig wollten sie ohne Plastik und andere, mühsam herbeizuschaffende Rohstoffe auskommen (wer nach Gaviotas will, muss 16 Stunden durch unwegsames, straßenloses Gelände fahren). So entwickelten die Ingenieure eine Erde-Zement-Mischung, die zum Großteil aus dem Savannenboden bestand. Diese verarbeiteten sie in einer selbstgebauten Presse ohne weitere Bindemittel zu Backsteinen – die Erde war feucht genug, um den Zement zu härten.

Aus demselben Material bauten sie Abwasserrohre, die mühelos das Gewicht mehrerer Lastwagen aushielten: Sie gossen einen Graben mit der Erde-Zement-Mischung aus, gossen Wasser in einen Plastikschlauch, so dass er die Form des späteren Hohlraums annahm, und füllten mit dem selbstgemachten Mörtel auf. Nach einem Tag war das Material ausgehärtet, und die Gavioteros holten den Schlauch wieder heraus.

1976 wurde Gaviotas von den Vereinten Nationen zu einer Modellgemeinde ernannt. Die Wissenschaftler erhielten Fördergelder und ein Reisebudget, um ihre Ergebnisse auf internationalen Konferenzen vorzustellen – und neue Ideen zu sammeln.

Im Lauf der Zeit entwickelte sich Gaviotas zu einer richtigen Gemeinde. Die Leute bauten ein Krankenhaus, Kindergärten, Schulen und eine große Gemeindehalle, in der das ganze Dorf sämtliche Mahlzeiten gemeinsam einnahm. Es klingt wie ein Märchen, wenn man liest, dass ohne jedes Wettbewerbs- und Eigentumsdenken alle gemeinsam hart arbeiteten und quasi alles miteinander teilten.

Die Gavioteros entwickelten hocheffiziente Warmwasser-Solaranlagen, die billig und ohne Hightech-Aufwand direkt in den Llanos hergestellt werden konnten. Mit einer einfachen Biogasanlage sammelten sie das Methan aus Kuhmist und leiteten es über Rohre zu den Feuerstellen der Gasherde im Krankenhaus. Sie bauten Kühlschränke und Trinkwasseraufbereitungsanlagen, schlossen Kinderwippen an ein Pumpsystem an, so dass in jeder Schulpause Grundwasser nach oben gepumpt wurde. Sie hatten so viele Ideen, dass sie gar nicht alle realisieren konnten.

Doch nach etwa zwei Jahrzehnten der Förderung bekam Gaviotas Anfang der 1990er Jahre kein Geld mehr. Nun drohte ihre Arbeit zu einem Überlebenskampf zu werden. Trotzdem blieben sie alle, denn Gaviotas war ihre Heimat geworden.

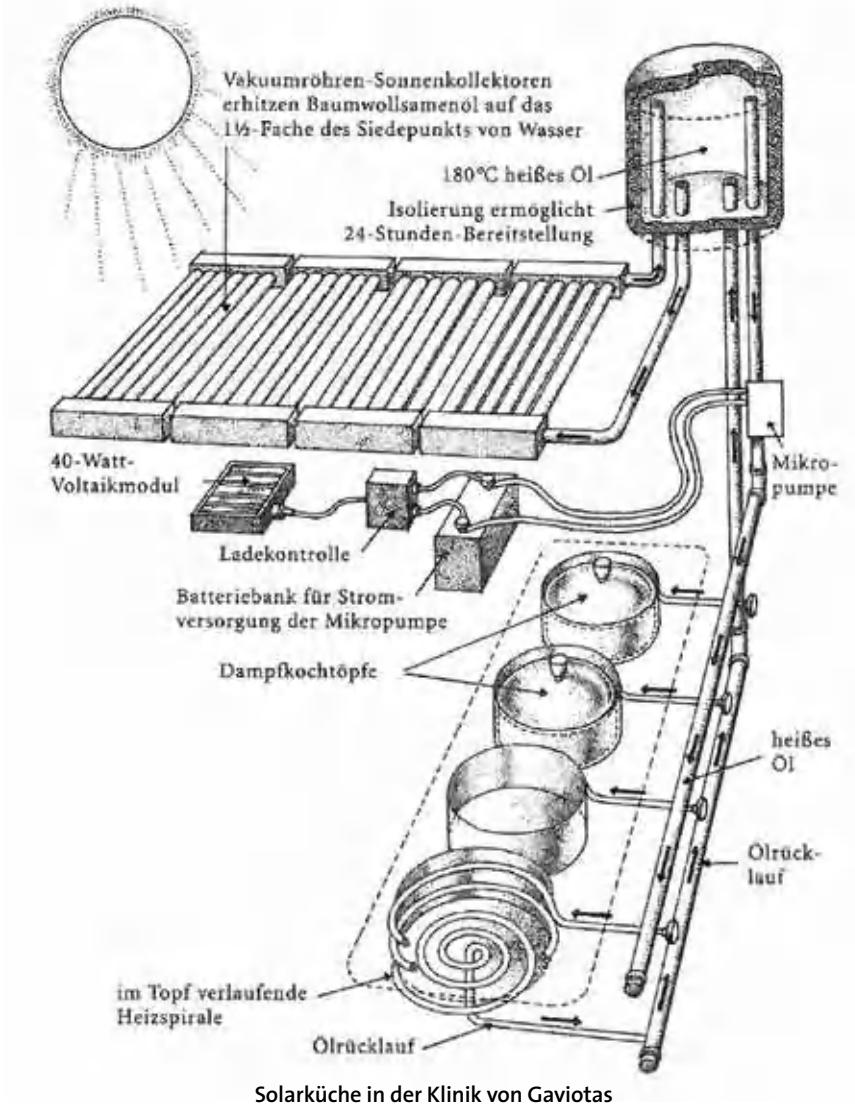
Und sie hatten Glück – ihre jahrelange Forschungsarbeit und ihre Neugierde zahlten sich aus. Jahre zuvor hatten einige Biologen Setzlinge von Karibischen Kiefern in den Llanos eingepflanzt. Damit die Bäume dem Boden genügend Nährstoffe entziehen konnten, hatten sie die Wurzeln mit Mykorrhizapilzen geimpft. Die Pilze vermehrten sich im Lauf der Zeit, weil die Gavioteros weder Insektizide noch künstliche Düngemittel verwendeten, und die Kiefern wuchsen prächtig heran.

Damit hatten die Gavioteros es geschafft, das Ödland in eine grüne Oase zu verwandeln. Das lokale Klima wurde ausgeglichener, und der Schatten der Bäume bot vielen Pflanzen und Tieren neuen Lebensraum. Doch wozu konnten sie den Wald nutzen? Bauholz und Zellstoff wären wegen des Transportaufwands auf dem Weltmarkt kaum konkurrenzfähig gewesen.

Genau zur richtigen Zeit stieß Lugari selbst durch einen Zeitungsartikel auf die entscheidende Möglichkeit: In Europa gab es bereits eine Nachfrage nach natürlichem Baumharz zur Verwendung in hochwertigen Farben, Klebstoffen, Kosmetika und Arzneimitteln, das durch Produkte auf Erdölbasis nicht zu ersetzen war. So lernten die Menschen in Gaviotas, hochwertiges Kiefernharz von den Bäumen zu zapfen, ohne ihr Wachstum zu beeinträchtigen. Aus irgendeinem Grund wuchsen die Bäume in den Llanos so rasant, dass die Gavioteros bereits nach acht statt der üblichen 20 Jahre einen immensen Harzertrag hatten. Zudem gewannen sie bei der Aufreinigung des Rohharzes als Nebenprodukt Terpentin, das sie ebenfalls verkaufen konnten.

Die Einwohner Gaviotas hatten es geschafft: Sie konnten sich selbst finanzieren. Lugaris Traum war Realität geworden.

Alan Weisman zerlegt die große Erzählung in viele kleine Geschichten über die verschiedenen Charaktere, die Gaviotas aufbauten und prägten, darüber, wie sie auf ihre kreativen Erfindungen kamen und warum Gaviotas für sie so lebenswert ist. Streckenweise springt der Autor von einer Anekdote zur nächsten und liefert die Pointe oft erst Seiten später nach. Viele technische



Solarküche in der Klinik von Gaviotas

Unsere Neuerscheinungen

Ahnerts

ASTRONOMISCHES JAHRBUCH 2013

Wo und wann ist welcher Planet am Himmel zu sehen? Welche besonderen Ereignisse sind in der kommenden Nacht zu beobachten? **Ahnerts Astronomisches Jahrbuch 2013** liefert alle wichtigen Informationen für das eigene Erkunden des Sternenhimmels. Der Kalender präsentiert Tag für Tag die bedeutendsten astronomischen Ereignisse. Sternkarten für jeden Monat, Beschreibungen der Himmelsobjekte und viele Astroaufnahmen erleichtern Ihnen die Orientierung am Nachthimmel. Für Einsteiger und fortgeschrittene Sternfreunde ist der **Ahnert** das unentbehrliche Standardwerk.
Zirka 210 Seiten mit zahlreichen, meist farbigen Fotografien und Grafiken. € 10,90 zzgl. Porto, als Standing Order € 8,50 inkl. Inlandsversand, ISBN: 978-3-941205-79-6, ab 28. 9. 2012 im Handel oder unter www.spektrum.com/ahnert zu bestellen.

KALENDER »HIMMEL UND ERDE 2013«

Astronomen präsentieren im Bildkalender »Himmel und Erde 2013« ihre schönsten Aufnahmen und lassen Sie an den fantastischen Möglichkeiten der modernen Naturbeobachtung teilhaben. Zusätzlich bietet er wichtige Hinweise auf die herausragenden Himmelsereignisse 2013 und erläutert auf einer Extraseite alle auf den Monatsblättern des Kalenders abgebildeten Objekte knapp und anschaulich. 14 Seiten; 13 farbige Großfotos; Spiralbindung; Format: 55 x 45,5 cm; € 29,95 zzgl. Porto; als Standing Order € 27,– inkl. Inlandsversand

www.spektrum.com/kalender2013

Alle Produkte sind im Handel erhältlich oder unter:

Spektrum DER WISSENSCHAFT
WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

online: spektrum.de/lesershop
E-Mail: service@spektrum.com
Tel.: +49 6221 9126-743

Fax: +49 6221 9126-751
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg

Konrad Adam

Kampf gegen die Natur. Der gefährliche Irrweg der Wissenschaft

Rowohlt, Berlin 2012. 272 S., € 19,95

Da hat sich der langjährige Feuilletonchef der »Frankfurter Allgemeinen Zeitung« und ehemalige politische Chefkorrespondent der »Welt« seine tiefempfundene Abneigung gegen die moderne Naturwissenschaft wortgewaltig von der Seele geschrieben. Diese Abneigung hat viele Wurzeln, darunter auch legitime – es gibt Größenwahn unter Forschern. Nur vermischt Adam das mit einem allgemeinen Wehklagen über die Naturwissenschaft selbst, das die übelsten Vorurteile gegen die Geisteswissenschaftler bestätigt: Sie sei »durch und durch esoterisch«, der unmittelbaren Wahrnehmung hoffnungslos entrückt und überhaupt vollkommen unverständlich. Merkwürdig: Hinter diesem Unfug steckt zweifellos ein kluger Kopf. Der hätte zumindest dem letzten Problem durch regelmäßige Lektüre von »Spektrum« mit leichter Mühe abhelfen können. CHRISTOPH PÖPPE

Werner Gruber, Heinz Oberhummer, Martin Puntigam

Gedankenlesen durch Schneckenstreicheln. Was wir von Tieren über Physik lernen können

Hanser, München 2012. 296 Seiten, € 19,90

Wer Schnecken streichelt – an der richtigen Stelle natürlich, und bitte nicht zu früh aufhören –, um in ihren Gehirnen neuronale Veränderungen zu bewirken, kann damit Nobelpreisträger werden (wie Eric Kandel, siehe Spektrum der Wissenschaft 11/1979, S. 58). Und wer rasant, unterhaltend und pointiert über solche Forschung berichtet, wird Popstar im Kleinkunstbetrieb. Zwei österreichische Physiker, deren satirisches Potenzial von einem Kabarettisten noch einmal kräftig aufgemotzt wird, sind als »Science Busters« zu solchen Stars geworden. In ihrem neuen Buch berichten sie nun über Verblüffendes aus dem Tierreich. Das Tempo des Textes ist derart hoch, dass man sich bei den eingestreuten Fact Boxes – etwa zu Graphen und Lithium-Akkus, zu Synchronizität und Spiegelneuronen, aber auch zum Unfug morphogenetischer Felder – regelrecht entspannen kann. THILO KÖRKEL

Bas Kast

Ich weiß nicht, was ich wollen soll.

Warum wir uns so schwer entscheiden können und wo das Glück zu finden ist

S. Fischer, Frankfurt am Main 2012. 288 S., € 18,99

Je mehr Möglichkeiten wir haben, unser Leben zu gestalten, desto rastloser und unzufriedener werden wir. Denn der Weg, der uns am meisten Glück beschert, ist in unserer komplexen Welt immer schwerer zu finden. Das illustriert der Psychologe und freie Autor Bas Kast anhand einer Fülle wissenschaftlicher Studien, deren anschauliche Darstellung er mit beispielhaften Anekdoten aus seinem eigenen Leben auflockert. Im zweiten Teil des Buchs führt er uns, wieder mit vielen wissenschaftlichen Belegen, schonungslos vor Augen, wie wir uns heutzutage Sozialleistungen erkaufen, für die wir uns früher auf Freunde und Familie verlassen haben. Angesichts der Präzision, mit der Kast die Problematik analysiert, enttäuscht es ein wenig, dass er am Ende auf die Frage, wo das Glück denn nun zu finden ist, nicht mehr als Pauschalantworten zu bieten hat. MAREN EMMERICH

Dale Templar, Brain Leith (Produktion)

Planet des Lebens

Polyband, München 2012. 400 Minuten, 3 DVDs, € 25,99, auch als Blu-ray erhältlich

Die BBC ist berühmt für ihre aufwändigen und häufig einzigartigen Natur- und Tier-Dokumentationen. Diesmal aber geht es, entgegen dem deutschen Titel, um den Menschen, wie er sich in teilweise extremen Umgebungen sein Leben, häufig sein Überleben, eingerichtet hat. Acht verschiedene Lebensräume haben die Filmemacher in vierjähriger Arbeit beleuchtet: »Leben am Meer«, »in der Wüste«, »in der Arktis«, »im Dschungel«, »im Gebirge«, »in der Steppe«, »am Fluss« und »in der Stadt«. So treffen wir in der ersten Folge auf die Bajau auf Borneo, die an Land »seekrank« werden, und zittern mit, wenn Rankenfußkrebssammler an der spanischen Küste jedes Mal ihr Leben für ihren Verdienst riskieren. Die Bilder und Informationen sind von der exzellenten Qualität, die man von der BBC gewohnt ist. Und sie bringen tatsächlich Neues: Ich zumindest habe hier von der Lebensweise vieler dieser Menschengruppen zum ersten Mal gehört. ELKE REINECKE

Beschreibungen sind mangels Skizzen kaum zu verstehen. Und zwischen all dem erzählt er nebenbei noch allerlei aus der Geschichte Kolumbiens, so dass der Leser das Projekt Gaviotas auch in die politischen Zusammenhänge einordnen kann.

Man kann nur staunen über dieses Dorf, das die Welt verbessern möchte, und bekommt Lust, sich mit eigenen Augen davon zu überzeugen. Doch das kann über ein großes Manko nicht hinwegtäuschen: Die Erstausgabe des Buchs erschien bereits 1998, zehn Jahre später eine überarbeitete Neuauflage. Noch einmal vier Jahre sind vergangen, bis nun die erste deutsche Übersetzung vorliegt. Das Vorwort zu dieser Ausgabe gibt kaum aktuelle Informationen, die der Leser sich aber dringend wünscht. So ist das Buch eindeutig veraltet. Die Idee, die hinter Gaviotas steckt, könnte jedoch aktueller nicht sein.

Janina Fischer
Die Rezensentin ist promovierte Chemikerin und arbeitet in Iserlohn.

Ulrich Herb (Hg.)
Open Initiatives
Offenheit in der digitalen Welt und Wissenschaft
Universitätsverlag des Saarlandes, Saarbrücken 2012. 220 S., € 13,50
Online unter http://universaar.uni-saarland.de/monographien/volltexte/2012/87/

INFORMATIONSWISSENSCHAFT

Die Zukunft der offenen Netze ist offen

Die vielfältigen Bestrebungen, Inhalte im Netz kosten- und restriktionsfrei verfügbar zu machen, rechtfertigen einen – hervorragend gemachten – Sammelband.

Die Vielfalt all dessen, was mit »Open« beginnt, ist schon fast unüberschaubar. Allein in den Titeln der Beiträge des vorliegenden Sammelbands kommen vor: Open Access, Open Source, Open Metrics, Open Science, Open Knowledge, Open Data, Open Collectivity. Und im Text werden noch sehr viel mehr »Offenheitsinitiativen« behandelt.

»Open« wird zum Paradigma für den Umgang mit Wissen und Information in elektronischen Umgebungen. Gemeint ist freie Verfügbarkeit, und zwar nicht nur kosten-, sondern auch restriktionsfrei. Manche Protagonisten wollen ein einmal öffentlich zugänglich gemachtes Werk modifizieren und weiterentwickeln dürfen – ein Konzept, das für Programmkodes unter dem Namen »Open Source« große Erfolge verzeichnet, aber in der Wissenschaft immer noch umstritten ist. Gelegentlich erklärt ein Autor sogar sein Werk für gemeinfrei und verzichtet damit auf das Recht, als Autor genannt zu werden.

Das Open-Prinzip setzt einen unübersehbaren Kontrapunkt zum immer noch dominierenden Verständnis, nach dem Wissen und Information Güter mit Eigentumscharakter sind und dementsprechend knapp gehalten, kontrolliert und kommerziellen Verwertungsansprüchen unterworfen werden dürfen.

Die Autoren des Bands stehen insgesamt dem Open-Konzept positiv gegenüber. Bis auf zwei Beiträge, die einem potenziell frauenfeindlichen und imperialistischen Charakter der Bewegung nachspüren (in der Tat dominieren un-

ANZEIGE

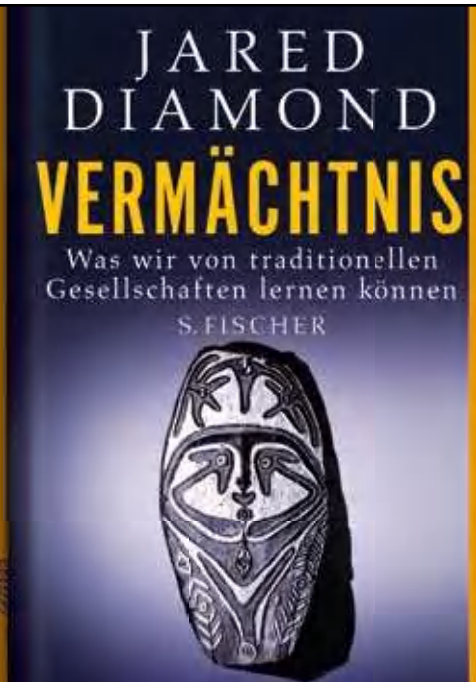
www.fischerverlage.de

Vorträge von Jared Diamond:
5. November, 19 Uhr: Berlin, Museum für Kommunikation
6. November, 20 Uhr: Zürich, Kaufleuten
7. November, 20 Uhr: Tübingen, Museum Obere Säle

Der neue Bestseller von Jared Diamond

Noch heute leben zahlreiche Stämme als Jäger und Sammler in unzugänglichen Teilen der Welt. Jared Diamond kennt sie aus vielen Expeditionen, die er in den letzten Jahrzehnten geleitet hat. In seinem neuen Buch entfaltet er den ganzen Reichtum ihrer verblüffend anderen Lebensweise. Eine überraschende und unterhaltsame Lektion über die Vielfalt der Kulturen – und eine Kritik unseres modernen Selbstverständnisses.

592 Seiten, gebunden, € (D) 24,99 Ein Buch von S. FISCHER



Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

ter deren Protagonisten unstreitig die männlichen Vertreter der westlichen Wissenschaftskultur), stellen die meisten Artikel umfangreiches Orientierungswissen bereit, allen voran der Einleitungsbeitrag von Ulrich Herb. Dem Soziologen, Wissenschaftsdienstleister und Leiter diverser Projekte an der Saarbrücker Universitätsbibliothek ist es offensichtlich ein Anliegen, die durchaus divergierenden Ansprüche und Ziele der verschiedenen Open-Gruppierungen zusammenzubringen.

Jens Klump vom GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ) befasst sich mit »Open Data«: dem Konzept, dass die mit öffentlichen Mitteln produzierten Daten aus den empirischen Wissenschaften frei und offen oder sogar gemeinfrei verfügbar sein sollten. Das klingt plausibel, ist jedoch höchst kontrovers. Während die Wissenschaftsorganisationen »Open Data« einfordern, sind die potenziellen Nutznießer wenig begeistert, weil sie zugleich die Datenproduzenten sind. Um ihre Basisdaten überhaupt nutzbar zu machen, müssten sie diese mit einer aussagekräftigen Dokumentation versehen, was mangels geeigneter Erfassungssoftware überaus aufwändig ist und vor allem nicht als eigenständige Leistung zählt, ebenso wenig wie die Bereitstellung der Daten selbst. Solange die Datenlieferung nicht die eigene Veröffentlichungsliste bereichert, wird sich das Open-Data-Konzept kaum so breit durchsetzen wie »Open Access« für die wissenschaftlichen, die Daten interpretierenden Texte.

Daniel Mietchen, Berater für webbasierte Wissenschaft aus Jena, setzt sich mit einem weiteren, durchaus heiklen Problem auseinander: Inwieweit lassen sich die klassischen Peer-Review-Verfahren durch offene Begutachtungs- und Bewertungsverfahren ergänzen oder ersetzen, die einer elektronischen Umgebung angemessen sind? Ebenfalls sehr informativ!

Vom klassischen Urheberrecht halten die Verfechter von Open Access verständlicherweise nicht viel. Eckhard Höffner kann gar nicht anders, als zu dem Schluss zu kommen, dass die »eigentumsähnliche Gestaltung des Urheberrechts« gestört sei und sich kaum mehr legitimieren lasse. Und John Hendrik Weitzmann zeigt am Beispiel des seit 1996 gültigen Leistungsschutzrechts der EU für Datenbanken die fatalen Auswirkungen einer solchen Regelung. Das Recht gewährt den Erstellern der Datenbanken einen weit gehenden Schutz ihrer Kompilationen. Das führt dazu, dass die Ersteller der Daten zwar die Arbeit leisten, aber den Erfolg, nämlich dass ihre Daten gefunden werden, nicht einfahren können. Denn vor dem Zugriff auf die Datenbank steht die Bezahlschranke des Datenbankanbieters. Der Ausweg wäre, dass die Datenproduzenten freie Lizenzen für die Nutzung der Daten vergeben dürfen. Welche Art von Lizenz wissenschaftsgerecht und für die Beteiligten akzeptabel wäre, ist noch in der Diskussion. Weitzmann plädiert für das von der Lizenzorganisation Creative Commons entwickelte Open Access Data Protocol.

Das Wikileaks-Prinzip ist zwar derzeit aus der politischen Debatte verschwunden, wird aber nicht in Vergessenheit geraten.

Über den Bereich der Wissenschaft hinaus, die in diesem Buch im Mittelpunkt steht, ist das Open-Konzept eine Herausforderung für die digitale Welt insgesamt. Das wird deutlich durch den detailreichen Beitrag von Nils Barnickel und Jens Klessmann zu den Daten des öffentlichen Sektors (»Open Government«). Artikel über »Offene Geodaten durch OpenStreetMap«, ein kollaboratives, nichtkommerzielles Gegenprojekt zu »Street View« von Google (Roland Ramthun), und über »Open Collectivity« – die Menge jener Leute, die sich anonym im Netz äußern und sich bereits dadurch in einem Kollektiv namens »Anonymous« wiederfinden (Carolin Wiedemann) – runden das Spektrum ab.

Die kontroverse Diskussion um Wikileaks zeigt, dass Begriffe wie Öffentlichkeit, Publizität, Transparenz, Aufklärung, Misstrauen, Geheimnis, Privatheit, Verrat, Macht und Kontrolle im elektronischen Umfeld neu bestimmt werden müssen – so der äußerst lesenswerte Artikel von Christiane Schulzki-Haddouti. Das Wikileaks zu Grunde liegende Offenlegungsprinzip ist zwar derzeit aus der politischen Debatte weit gehend verschwunden, aber niemand kann darauf hoffen, dass es in Vergessenheit gerät. Für Schulzki-Haddouti deutet alles darauf hin, dass Wikileaks »Teil einer weitreichenden, weltweiten Transparenzbewegung ist, die von staatlichen wie privaten Institutionen mehr Offenlegung ihrer Aktivitäten verlangt«. Wohin das führt, ist – nun ja – offen.

Unvermeidlich bleiben einige Aspekte des vielschichtigen Themas ausgeblendet, so vor allem der informationsökonomische. Zunehmend kommen den wissenschaftlichen Verlagen die Autoren abhanden, weil die Nutzung ihrer Werke durch kommerzielle Verwertung verknappt wird. Verlage wie Springer fangen daher an, Zeitschriften nach Open-Access-Prinzipien (entgeltfreie Nutzung für jedermann) zu veröffentlichen, erwarten allerdings, dass die Öffentlichkeit die Erstellung dieser Zeitschriften finanziert (und damit auch die Gewinne der Verlage), wie das bisher über die Bibliotheken geschieht. Das würde zu erheblichen Umschichtungen öffentlicher Mittel führen.

Dass Open Source im Sammelband fehlt, kann man angesichts der reichen Literatur dazu verschmerzen.

Ulrich Herb hat eine beeindruckende Vielfalt an Open-Themen aufgespürt und dafür kompetente, meistens jüngere Autoren gefunden. Dem Thema entsprechend ist der Band auch via Open Access verfügbar.

Rainer Kuhlen

Der Rezensent ist Professor für Informationswissenschaft an der Universität Konstanz.

Top-Ärzte. Aus ganz Deutschland. Auf einen Blick.

In FOCUS-GESUNDHEIT bündeln wir die Erfahrung unserer Fachredaktion mit der Kompetenz von Experten.

JETZT AM KIOSK.

FOCUS-GESUNDHEIT gibt es auch unter:
Tel. 0180 5 480 1006*,
Fax 0180 5 480 1001
www.focus-gesundheit.de

*0,14 €/Min. aus dem dt. Festnetz. Mobil max. 0,42 €/Min.

Verständlich präsentiert:
196 Seiten prallvoll mit den wichtigsten Gesundheitsthemen: Die FOCUS Ärzteliste ist fundiert, nutzwertstark und wird verständlich präsentiert.

Exzellent recherchiert:
Die FOCUS Ärzteliste basiert auf Kollegen-Empfehlungen von Klinikchefs, Oberärzten und niedergelassenen Spezialisten sowie persönlichen Erfahrungen von Patienten und Selbsthilfegruppen.

Erfahrungsbasiert:
FOCUS-GESUNDHEIT hat bereits fünfmal die besten Ärzte Deutschlands in ausgewählten Fachgebieten getestet und bewertet. Auch diese Erfahrung steckt in der sechsten Ausgabe!

Wissen, das hilft. FOCUS GESUNDHEIT

Signale aus dem Magen

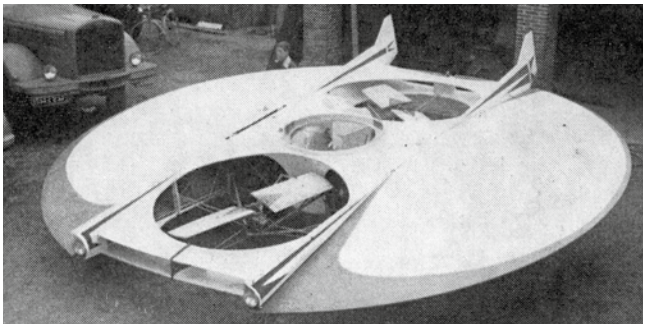
»Die üblichen Methoden mit Hilfe des Magenschlauches zur Feststellung des pH-Wertes des Magensaftes lassen sich nun durch einen verschluckbaren Hochfrequenzsender durchführen. Er gibt die Meßergebnisse nach außen ab. Der Sender ist für einmaligen Gebrauch vorgesehen, da die Kapsel den Körper auf natürlichem Wege verläßt. In verschiedenen Universitätskliniken und Krankenhäusern wird diese Methode bereits verwandt.« Naturwissenschaftliche Rundschau 11, 1962, S. 447

UFO gesichtet

»Jean Grimaldi konstruierte den ersten fliegenden Teller Frankreichs. Sein Durchmesser beträgt 7 m, sein Gewicht 270 Kilo. Er ist mit zwei Volkswagenmotoren ausgerüstet, von denen jeder zwei Propeller treibt. Der ›Teller‹ erreicht eine Geschwindigkeit von 150 Stundenkilometer.« Neuheiten und Erfindungen 324, 1962, S. 201

Lärmrecycling

»Zur Zeit ist ein Energie-Wandler in Entwicklung, der die Fähigkeit hat, den Lärm der Antriebs-Aggregate von Düsenflugzeugen in Elektrizität umzuwandeln. In der endgültigen Form soll das Gerät soviel Elektrizität erzeugen, daß das elektrische System einer mit vier Aggregaten angetriebenen Maschine versorgt werden kann. Dadurch wird die Reichweite dieser Flugzeuge vergrößert, denn im Augenblick wird ein Drittel des mitgeführten Brennstoffes zur Erzeugung des notwendigen Stromes verbraucht.« Elektronik 11, 1962, S. 348



Ein UFO made in France.

»Brutpflege« bei Kreuzottern

»In dem Bändchen Floerickes über ›Kriechtiere und Lurche fremder Länder‹ wird mitgeteilt, daß junge Klapperschlangen bei Gefahr in den Rachen ihrer Mütter flüchten. Nun schrieb uns Herr Dr. Naubert Leipzig, daß er vor Jahren ganz ähnliches bei unserer einheimischen Kreuzotter beobachtet habe. Wir geben aus dem darob entstandenen Briefwechsel den Bericht des Bahnwärters Nestler aus Wolkenstein wieder: ›Er sah am Bahndamm eine Otter liegen, die hatte sich zusammengeringelt, und in der Mitte hatte sie die Jungen, 8–10 Stück. Beim Herannahen des Bahnwärters sperrte die Otter das Maul auf, und die Jungen schlüpften hinein. Nun verschwand die Otter in einem nahegelegenen Loch.‹« Kosmos 11, 1912, S. 447

Kühne Konstruktion

»Ein anschaulicher Beweis für die Festigkeit des Eisenbetons wurde auf einer Ausstellung geliefert. Die Kühnheit des Bauwerkes liegt darin, daß die Treppe ohne Pfeiler oder Stützen in geknicktem Lauf gewissermaßen aus dem Erdboden herauswächst und sich freistehend im Gleichgewicht hält, ohne umzukippen. Die Abmessungen der Treppenläufe, der Plattform und des Pavillons sind dabei so gering, daß es auf den ersten Blick kaum glaublich erscheint, daß sich das Ganze selbst tragen kann. In Wirklichkeit aber halten Treppen, Plattform und Pavillon noch dazu eine Belastung (durch Menschengedränge) von 500 kg auf den Quadratmeter völlig sicher aus.« Technische Monatshefte 11, 1912, S. 346

Treppe ohne Träger dank Eisenbeton.

Frischfisch im Eis

»Man hält die Fische einige Stunden bei einer dem Gefrierpunkt nahen Temperatur. Dann läßt man bis auf 0° abkühlen und läßt die Fische 15–18 Stunden stehen. Dann läßt man das Wasser gefrieren, indem man das Gefäß in eine Kältemischung eintaucht. Man hat dann eine wenige Zentimeter dicke Scheibe von Eis, eine Art Kuchen, der die eingefrorenen Fische enthält. Der wird in ein Tuch eingeschlagen und mit wärmeundurchlässigem Stoff versehen. Das Auftauen muß sehr langsam geschehen. Sollen die Fische wieder zum Leben erweckt werden, so ist es nötig, sie mehrere Stunden bei annähernd 0° im Wasser zu halten. Sollten nicht alle lebendig werden, so sind doch auch die toten im allerbesten Erhaltungszustand.« Die Umschau in Wissenschaft und Technik 49, S. 1046

AUS ZEITSCHRIFTEN DER FORSCHUNGSBIBLIOTHEK FÜR WISSENSCHAFT- UND TECHNIKGESCHICHTE DES DEUTSCHEN MUSEUMS

Die Geschenkidee* für junge Wissenschaftler!

* Spektrum neo jetzt auch im Abo:
Für alle Kinder zwischen 10 und 14 Jahren, die nicht nur das »Was«, sondern auch das «Wie« und »Warum« interessiert.
4 Ausgaben für nur € 5,50 pro Heft.
(Das Abo ist jederzeit kündbar)

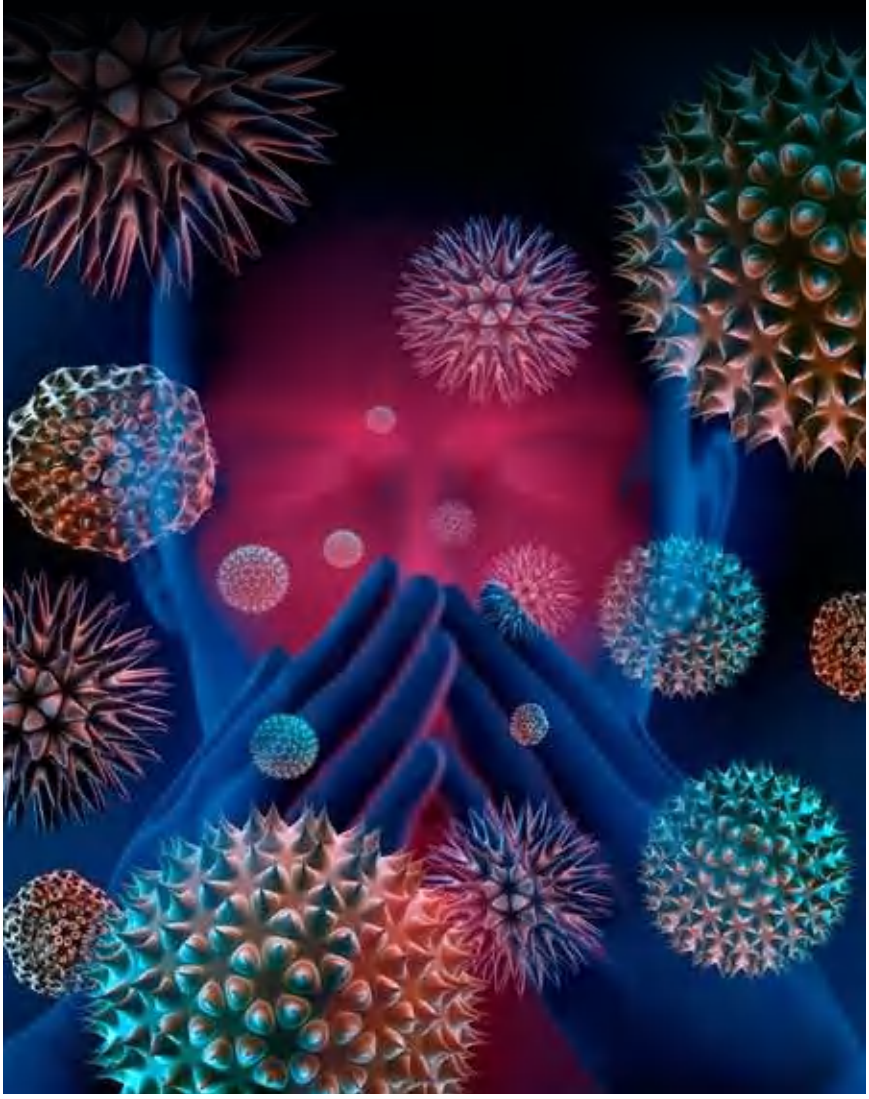
Als Dank für Ihre Bestellung erhalten Sie ein Präsent Ihrer Wahl!

Bestellen Sie jetzt für Ihr Kind!

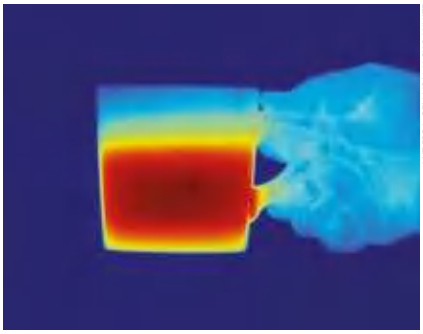
www.spektrum-neo.de/abo

Volksseuche Allergie

Es ist paradox: Je größer der Wohlstand, je besser die Ernährung, sauberer die Umwelt und höher die Hygienestandards, desto mehr greifen Allergien um sich. Eine vierteilige Serie beleuchtet die vielfältigen Aspekte dieser ebenso rätselhaften wie fatalen Fehlfunktionen unseres Immunsystems.



FOTOLIA / PS DESIGN 1



MIT FRDL. GEN. VON JACK R. WHITE

Herschels Erbe

Infrarotes Licht kann heute jeder mit speziellen Kameras sichtbar machen. Doch Ende des 18. Jahrhunderts war das Rätsel der »strahlenden Wärme« noch ungelöst. Erst der hannoveranisch-britische Astronom William Herschel ersann die entscheidenden Experimente, die den Durchbruch brachten.

PHOTO RESEARCHERS / HANS REINHARD

Wann kippt ein Ökosystem?

Mit Modellen zu den Nahrungsbeziehungen möchten Forscher früh genug vorhersagen, ob ein Ökosystem umzukippen droht. Denn ab einem bestimmten Punkt ist es fast unmöglich, das Desaster aufzufangen oder die Entwicklung umzukehren.

Das Universum in der Kiste

Anatoly Klypin von der New Mexico State University leitet ein Projekt namens »Bolshoi«, eine immens aufwändige Simulation des Weltalls vom Urknall bis heute. Das Programm arbeitet mit mehr als acht Milliarden Einzelobjekten. Damit ist sie aber immer noch sehr grob: Jedes Objekt muss 200 Millionen Sonnenmassen vertreten.

Vermessenes Glück

Die Deutschen werden zwar immer reicher, fühlen sich aber nicht besser. Dieses Paradox scheint die ökonomische Glücksforschung heute zu widerlegen. Wirtschaftswissenschaftler suchen daher nach einem neuen Verständnis von Lebensqualität und Wohlstand und behaupten: *Das* Glück gibt es gar nicht.

NEWSLETTER

Möchten Sie regelmäßig über die Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?

Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:
www.spektrum.com/newsletter

Naturwissenschaftliches Wissen aus erster Hand für Schulen und Schüler

AUS DER FORSCHUNG IN DEN UNTERRICHT

Das Projekt Wissenschaft in die Schulen!

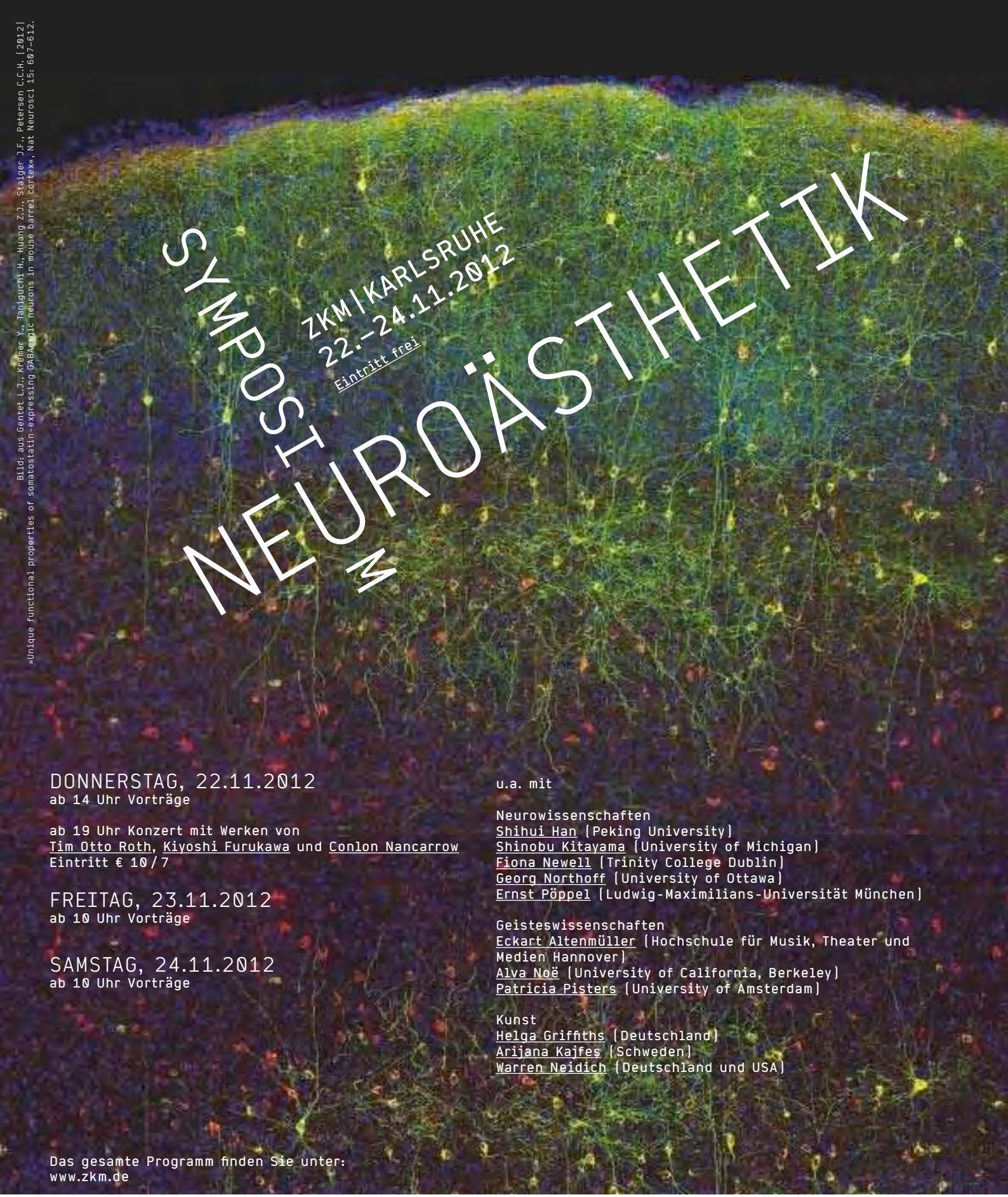
Jugendliche nachhaltig für Naturwissenschaft begeistern – das ist das Ziel der Initiative „Wissenschaft in die Schulen!“. Wir zeigen durch unsere Unterrichtsmaterialien zu aktuellen Themen aus der Forschung, dass Biologie, Physik, Chemie, Mathematik, Geowissenschaften und Astronomie spannende Fächer sind. Wir – das sind der Verlag Spektrum der Wissenschaft, die Gesellschaft für Biochemie und Molekularbiologie sowie das Max-Planck-Institut für Astronomie.

Unterstützen Sie das Projekt

Ohne weitere Partner ist die Realisierung des Projektes nicht möglich und deshalb möchten wir Sie einladen, das Projekt aktiv zu unterstützen. Wenn Sie wissen möchten, wie Sie sich persönlich oder als Firma einsetzen können, dann finden Sie hier Informationen dazu: **www.wissenschaft-schulen.de**

TAUSENDE SCHÜLER SIND SCHON DABEI. TAUSEND DANK AN UNSERE SPONSOREN!

Märkischer Arbeitgeberverband | Großdrebnitzer Agrarbetriebe | Freundeskreis des evang. Heidehofgymnasiums Stuttgart | Symbio Herborn Group | Weinmann GmbH | Stadtwerke Düsseldorf | Karl-Möller-Stiftung | Förderverein des Eichenfeldgymnasiums | Kernkraftwerk Isar, Essenbach | HUK Coburg | Verein der Freunde und Förderer des Gymnasiums der Stadt Kerpen | Vollmer Werke Maschinenfabrik GmbH | Förderverein »Freunde des Helmholtzgymnasiums« Zweibrücken | Freundeskreis des Gymnasiums Neuenbürg | Freundeskreis des Hartmanni-Gymnasiums | Sternwarte am Wallgarten



»Unique functional properties of somatostatin-expressing GABAergic neurons in mouse barrel cortex«, Nat Neurosci 15: 607–612.
Bild: aus Gentet L.J., Kremer Y., Taniguchi H., Huang Z.J., Staiger J.F., Petersen C.C.H. (2012)

SYMPOSIUM NEUROÄSTHETIK

ZKM | KARLSRUHE
22.–24.11.2012
Eintritt frei

DONNERSTAG, 22.11.2012
ab 14 Uhr Vorträge

ab 19 Uhr Konzert mit Werken von
Tim Otto Roth, Kiyoshi Furukawa und Conlon Nancarrow
Eintritt € 10 / 7

FREITAG, 23.11.2012
ab 10 Uhr Vorträge

SAMSTAG, 24.11.2012
ab 10 Uhr Vorträge

u.a. mit

Neurowissenschaften
Shihui Han (Peking University)
Shinobu Kitayama (University of Michigan)
Fiona Newell (Trinity College Dublin)
Georg Northoff (University of Ottawa)
Ernst Pöppel (Ludwig-Maximilians-Universität München)

Geisteswissenschaften
Eckart Altenmüller (Hochschule für Musik, Theater und Medien Hannover)
Alva Noë (University of California, Berkeley)
Patricia Pisters (University of Amsterdam)

Kunst
Helga Griffiths (Deutschland)
Arijana Kajfes (Schweden)
Warren Neidich (Deutschland und USA)

Das gesamte Programm finden Sie unter:
www.zkm.de

Mit freundlicher Unterstützung und in Kooperation mit der
Gemeinnützigen Hertie-Stiftung

Gefördert durch
Baden-Württemberg
MINISTERIUM FÜR WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND KUNST

Medienpartner
Spektrum.de
GEHIRN UND GEIST
www.dasgehirn.info
Der Kosmos im Kopf

ZKM Zentrum für Kunst und Medientechnologie Karlsruhe
Lorenzstraße 19, 76135 Karlsruhe

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

NOBEL-PREISE 2012

DEZEMBER 2012

Spektrum DER WISSENSCHAFT 12/12

KERNFUSION
Der steinige Weg zur Zähmung des Sonnenfeuers

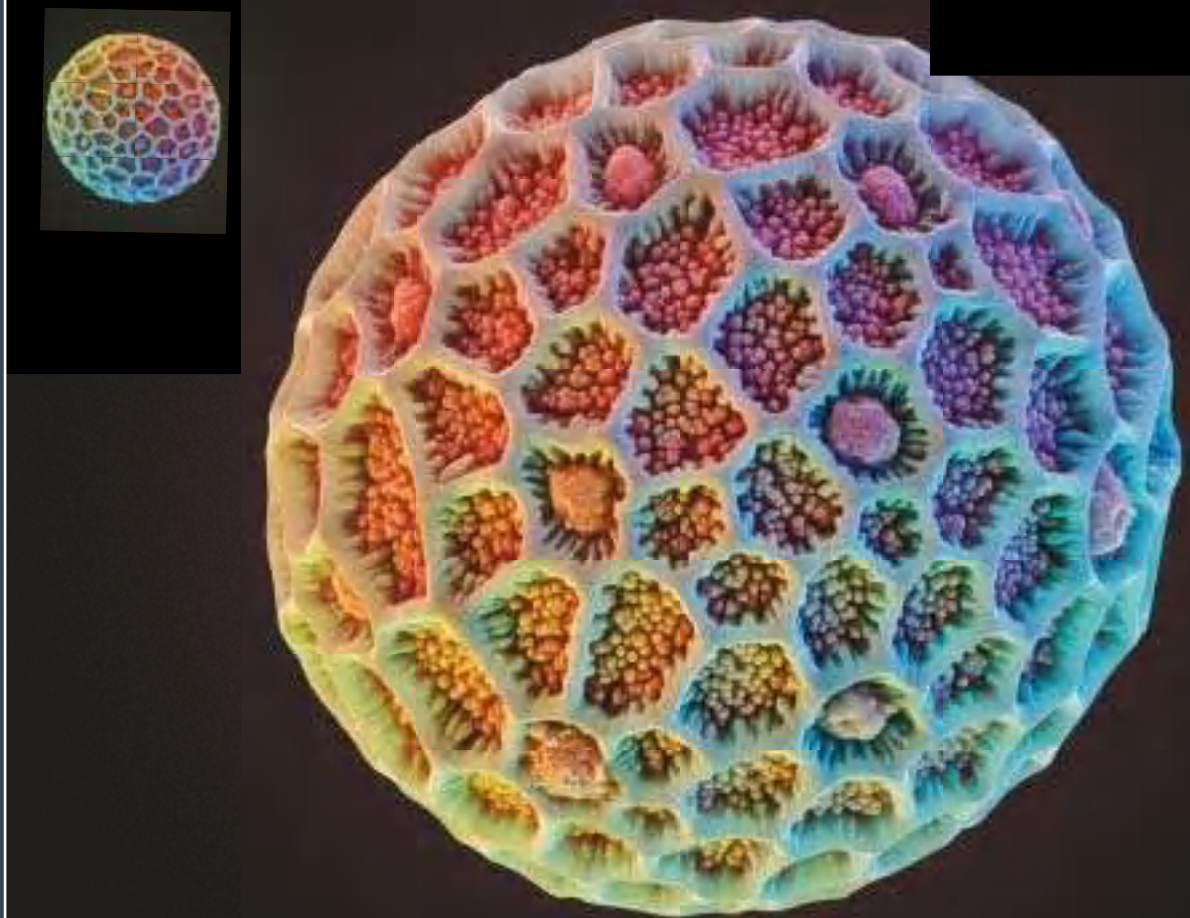
HIRNFORSCHUNG
Was bei einem »Blackout« im Kopf passiert

SIMULATION
Wie berechnet man das Universum?

NEUE SERIE

Allergien

Die Geißel des 21. Jahrhunderts



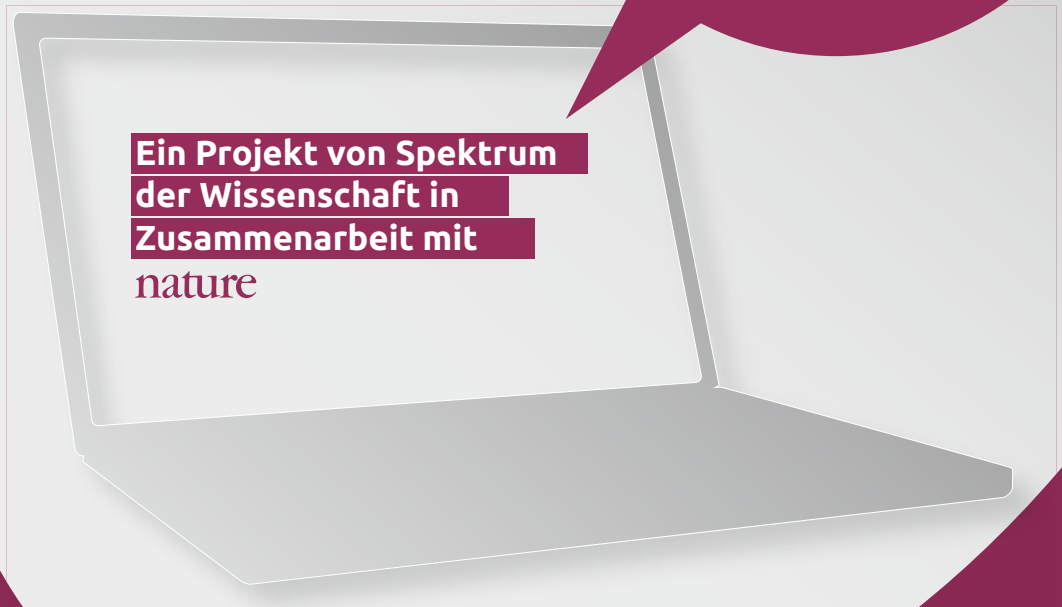
7,90 € (D/A) · 8,50 € (L) · 14,– sFr.
D6179E

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

www.spektrum.de

SciLogs

Diskutieren Sie mit – auf unserem Portal für Wissenschaftsblogs!



Ein Projekt von Spektrum der Wissenschaft in Zusammenarbeit mit
nature

Jetzt auch auf Englisch!

www.SciLogs.com
www.SciLogs.de

Auf SciLogs bloggen mehr als 100 Wissenschaftler aus den verschiedensten Fachgebieten sowie mehrere Wissenschaftsjournalisten. Ihr Anliegen ist der interdisziplinäre Dialog über Wissenschaft in all ihren Fassetten: Forschung, Anwendung, Politik, Ethik, Werte.

Deutschlands erstes digitales, wöchentliches Wissenschaftsmagazin

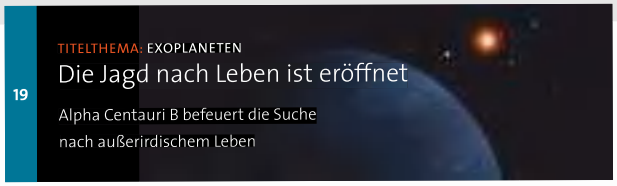
Jetzt 4 Ausgaben GRATIS

Spektrum DER WISSENSCHAFT DIE WOCHE

www.spektrum.de/viermal

www.spektrum.de/viermal

INHALT

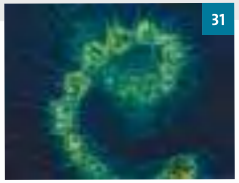


19

TITELTHEMA: EXOPLANETEN

Die Jagd nach Leben ist eröffnet

Alpha Centauri B befeuert die Suche nach außerirdischem Leben



31

UMWELT

Geoengineering auf eigene Faust

Ein privates Meeresdüngungsexperiment im Pazifik ruft scharfe Kritik hervor

aus nature

26

KLIMAZWIST

»Die Risiken wurden weichgespült«

Ein neues offizielles Klimagutachten verursacht einen Eklat. Spektrum.de sprach mit Wolfgang Cramer über die Hintergründe

36

ZUKUNFTSFORSCHUNG

Der Klimakrieg fällt aus – vorerst

Vorhersagen über die sozialen und politischen Auswirkungen der globalen Erwärmung bleiben schwierig

02 EDITORIAL/IMPRESSUM

04 BILD DER WOCHE
Lebende Kabel

06 MEINUNG
»Bequeme Sündenböcke«
von Lars Fischer

43 REZENSION
Joan L. Slonczewski, John W. Foster:
Mikrobiologie

45 NATURE JOBS

SPEKTROGRAMM

08 PALÄOKLIMA
Tödliche Hitze in der Trias

11 MIMIKRY
Beluga imitiert menschliche Stimmen

12 MATHEMATIK
Geometrie im Sinn

14 TEKTONIK
Menschen lösten tödliches Beben aus

16 EVOLUTION
Menschliche Blutgruppen sind uraltes Erbe

18 HYDRODYNAMIK
Fisch jagt mit Spucke und Physik

Spektrum DER WISSENSCHAFT DIE WOCHE

www.spektrum.de/viermal

www.spektrum.de/viermal

JIE SONG AND NILS RISGAARD-PETERSEN

Bakterienketten als natürliche Stromkabel? Das klingt für kurze Distanzen plausibel, aber kaum über größere Entfernungen. Doch Forscher um Nils Risgaard-Petersen und Lars Peter Nielsen von der Universität Aarhus liefern nun gute Argumente für genau dieses Szenario: bakterielle Stromkabel, die im Meeresboden zwischen aeroben und anaeroben Schichten vermitteln.

Im Jahr 2010 hatten Risgaard-Petersen und Nielsen berichtet, dass sie in Meeressedimenten einen Stromfluss beobachtet hatten, der biochemische Prozesse in den oberen, sauerstoffreichen Schichten mit denen in tiefer liegenden, sauerstofffreien Zonen koppelten. Bisher bekannte Transportmechanismen überbrücken jedoch nur Distanzen im Nano- bis Mikrometerbereich - hier handelte es sich aber um Abstände von Milli- bis Zentimetern. Wer oder was steckte dahinter?

Wie die Wissenschaftler im Labor erkundeten, lässt sich diese Stromlieferung unterbrechen: Ein horizontal durchs Sediment gezogener Draht oder eine für Bakterien undurchlässige Membran verhinderten den Elektronentransport erfolgreich. Und ein genauerer Blick auf die tieferen, so genannten sulfidischen Schichten, offenbarte ein dichtes Netz aus Bakterienfilamenten, die jeweils aus unzähligen Zellen bestanden und zum Teil Längen von bis zu 1,5 Zentimetern erreichten (hier in blau, nachträglich eingefärbte rasterelektronenmikroskopische Aufnahme).

Die Mikroorganismen zählen zur Familie der Desulfobulbaceae, die sowohl Schwefelwasserstoff produzieren als auch verarbeiten können. Dies tun sie im periplasmatischen Raum zwischen der inneren und der äußeren Membran. Interessanterweise ist diese äußere Membran bei den Bakterienkabeln rillenartig, so dass auf der Oberfläche der Mikroben regelrechte Röhren entstehen, die sich entlang aller Zellen der Filamente ziehen. Ihr Inhalt besteht aus überwiegend geladenen Molekülen: Hier könnte also der Elektronentransport stattfinden. Ob das auch stimmt, müssen weitere Experimente jedoch erst klären. <

Nature 10.1038/nature11586, 2012

Spektrum DER WISSENSCHAFT DIE WOCHE

www.spektrum.de/viermal

UMWELT
Geoengineering auf eigene Faust
von Jeff Tollefson
Ein privates Meeresdüngungsexperiment für vermeintlichen Klimaschutz und bessere Fischfangerträge im Pazifik ruft scharfe Kritik hervor. Die Beteiligten berufen sich auch auf dubiose deutsche Emissionszertifikate.
NOAA (PUBLIC DOMAIN)
31

Exklusive Übersetzung aus nature

Russ George handelte in bester Absicht – zumindest in seinen Augen –, als er im Juli von einem gecharterten Fischerboot aus 100 Tonnen Eisensulfat in den Pazifischen Ozean vor der kanadischen Westküste kippte. Das Ziel: das Meeresökosystem zu befruchten. Der Eisendünger sollte eine Algenblüte auslösen, die Lachsbestände fördern und Kohlenstoff klimawirksam in die Tiefsee verfrachten. Ob der Ozean wie gewünscht reagierte, weiß bislang keiner offiziell, doch das Experimente sorgt für hitzige Diskussionen an Land. Wissenschaftler reagierten verärgert, Angehörige eines Indianerdorfs an der Küste sehen sich bloßgestellt, und Gegner des so genannten Geoengineerings, des Klimaschutzes durch technische Eingriffe in die Umwelt, laufen erzürnt Sturm.

Die ersten Berichte in der britischen Tagsezeitung »The Guardian« am 1. Oktober stellten das Projekt als quasianarchisches Geoengineering-Vorhaben dar – das bislang größte seiner Art –, das unverhohlen internationale Übereinkommen verletze. Kritiker unterstellten dem US-amerikanischen Unternehmer Russ George, dass er Mitglieder des Haida-Stamms aus dem Dorf Old Massett auf den Königin-Charlotte-Inseln überredet habe, die Düngung zu finanzieren. Im Gegenzug habe er ihnen in Aussicht gestellt, dass sie dafür Emissionszertifikate verkaufen dürften, weil die Algen entsprechend Kohlendioxid aufnähmen. Tatsächlich war der Ablauf jedoch noch viel komplexer. Der ganze Vorgang zeigt erneut, wie explosiv die Mischung aus Politik und halb garer Wissenschaft zur technischen Manipulation des Erdklimas werden kann.

Die Rolle des Haida-Stamms

Nachdem George von »Nature« kontaktiert wurde, keilte er gegen die Medien und »radikalen Umweltschützer« aus, die eine »rassistische« Geschichte über einen eigenbrötlerischen, selbst ernannten Geoingenieur konstruierten, der naive Ureinwohner übervorteilt hätte. »Das war deren Arbeit und deren Projekt«, fügt er an. »Es kam doch nicht deshalb dazu, weil sie irgendwie zu dumm waren, um es besser zu wissen!«

Mittlerweile steht fest, dass Old Massett, ein indigenes Fischerdorf mit weniger als 1000 Einwohnern, das Projekt begeistert aufgenommen hatte: Die Bevölkerung erhoffte sich davon, dass wieder mehr Lachse aus dem Meer zu ihren Laichgründen in den Flüssen der Insel zurückkehren. Dazu sollte eine Algenblüte angestoßen werden, welche dann das gesamte ozeanische Nahrungsnetz bis hin zu den Fischen stärken könnte. Die Dorfbewohner stimmten im Februar 2011 dafür, einen Kredit in Höhe von etwa 2,5 Millionen US-Dollar an die Haida Salmon Restoration Corporation (HSRC) zu vergeben, damit diese den Ozean dünge, so John Disney, der Vorsitzende der Korporation aus Old Massett und Wirtschaftsbürgermeister des Dorfs.

George unterschrieb als Chefwissenschaftler, nachdem das HSRC auf ihn zugekommen war, so Disney – zuvor führte

Spektrum DER WISSENSCHAFT DIE WOCHE www.spektrum.de/viermal

Jetzt jeden Donnerstag!

- mit mehr als 40 Seiten Analysen, News, Kommentaren und Bildern aus der Forschung
- im Abo nur 0,77 € pro Ausgabe
- jederzeit kündbar

***Spektrum – Die Woche* ist ein Magazin im PDF-Format für digitale Endgeräte.**

Lesen Sie *Spektrum – Die Woche* viermal gratis!

www.spektrum.de/viermal

Hartwig Hanser
Redaktionsleiter
hanser@spektrum.com

Kampf des Immunsystems gegen Windmühlen

Ich erinnere mich noch deutlich an meinen ersten Heuschnupfenanfall als Kind: Es war auf einer großen Gartenausstellung, als mir plötzlich die Augen tränten und ich heftig anfing zu niesen. Was genau damals der Auslöser war, weiß ich bis heute nicht, aber seitdem haben die Monate April bis Juni für mich deutlich an Reiz verloren.

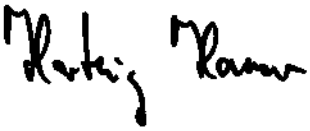
Dabei bin ich noch vergleichsweise glimpflich davongekommen: Einen Bekannten von mir bringen etwa schon kleinste Mengen von Nüssen im Essen in Lebensgefahr. Ein wenig tröstet auch, dass es wahrlich nicht an Leidensgenossen mangelt. Je nach Studie wird bis zu einem Viertel der Bevölkerung hier zu Lande von Heuschnupfen geplagt, im Fachjargon als saisonale allergische Rhinitis bezeichnet. Insgesamt dürfte sogar rund ein Drittel aller Mitteleuropäer irgendeine Allergie haben. Besonders auffällig sind die Zahlen beim atopischen Ekzem, besser bekannt unter der Bezeichnung Neurodermitis: Während inzwischen mindestens jedes zehnte Vorschulkind darunter leidet, sind bei Erwachsenen nur rund zwei bis drei Prozent betroffen – etwa der Anteil, der vor 50 Jahren für Kleinkinder galt.

Daran zeigt sich exemplarisch: Allergien haben in den letzten Jahrzehnten dramatisch zugenommen, vor allem in den westlichen Ländern. Und es sieht ganz danach aus, als würde sich dieser Trend fortsetzen. Die exakten Gründe für das explosionsartige Umsichgreifen der Überempfindlichkeitsreaktionen sind noch ungeklärt – Hypothesen gibt es viele, etwa jene, dass bessere Hygiene dabei ein entscheidender Faktor ist. Vielleicht kommt hier auch unser »Mikrobiom« ins Spiel, jene Abermilliarden von Mikroorganismen, die in und auf unserem Körper leben und dort wichtige Aufgaben erfüllen (siehe Titelthema im letzten Heft).

Dem komplexen Phänomen »Allergie« versuchen wir uns mit einer vierteiligen Serie zu nähern, die mit dieser Ausgabe beginnt und auf Artikeln beruht, die ursprünglich in »Nature« erschienen sind. Um einen möglichst vollständigen Überblick über das Fachgebiet zu ermöglichen, haben wir uns zu einer für uns eher ungewöhnlichen Darstellung entschlossen: Statt eines längeren Übersichtsartikels präsentieren wir Ihnen eine Zusammenstellung kürzerer Texte, die in jedem Serienteil mehrere verschiedene Aspekte beleuchten.

Ab S. 31 beschreibt Paige Brown eine typische – ihre eigene – Allergikerkarriere und berichtet von einem neu entdeckten Schlüsselprotein, auf das Mediziner große Hoffnungen als Ansatzpunkt für Therapien setzen. Den Ursachen für die Ausbreitung der Überempfindlichkeitsreaktionen und hier speziell der Hygienehypothese geht der Artikel ab S. 34 nach – und stellt fest, dass möglicherweise unsere gesamte moderne westliche Lebensart dem Übel zu Grunde liegt. Um neue Erfolge beim Kampf gegen Lebensmittelallergien geht es ab S. 38: In Studien bewährte es sich, Kleinkinder schon früh mit potenziell allergener Nahrung in kleinen Mengen vertraut zu machen. Und schließlich beschreibt Hywel Williams von den britischen Nottingham University Hospitals den derzeitigen Stand des Wissens zur Neurodermitis (ab S. 42).

Eine anregende Lektüre wünscht Ihr



AUTOREN IN DIESEM HEFT

Drei Neuroforscherinnen von der Yale School of Medicine, **Amy Arnsten, Rajita Sinha** und **Carolyn Mazure** (von links nach rechts), beschreiben, was genau im Gehirn abläuft, wenn wir unter Stress einen Blackout erleben (S. 44).

Zusammen mit der Archäologin **Susanne Willer** (links) berichten die archäologischen Restauratoren **Kati Bott** und **Frank Willer** über die Erforschung überlebensgroßer Bronzestatuen am Limes. Besonders faszinieren sie die Vergoldungstechniken (S. 70).

Eine verbreitete These besagt, dass Menschen keineswegs zufriedener und glücklicher werden, wenn sie mehr Geld zur Verfügung haben. Neue Studien stellen das allerdings in Frage, so die Wirtschaftswissenschaftler **Joachim Weimann, Ronnie Schöb** und **Andreas Knabe** (von rechts nach links) ab S. 76.

11 **Editorial**

14 **Leserbriefe/Impressum**

16 **Spektrogramm**
Maus wirft Fell ab • Wasser auf dem Mond • Biologisch abbaubare Elektronik • Künstliche Schilddrüse • Schleimpilze weichen eigener Spur aus • Neue Erdplatten

19 **Bild des Monats**
Lebende Stromkabel

▸ 20 **Forschung aktuell**

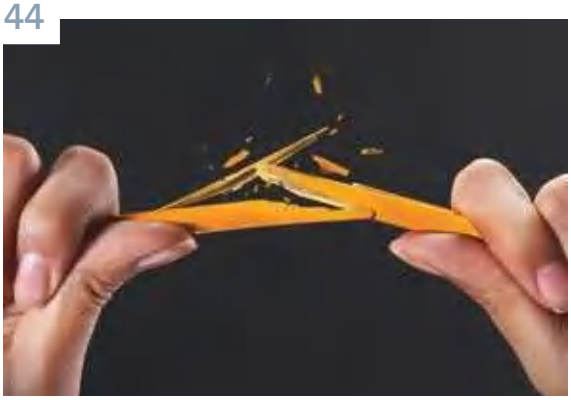
Nobelpreis für Medizin
Revolution in der Stammzellforschung.

Nobelpreis für Physik
Verhalten von Quantensystemen.

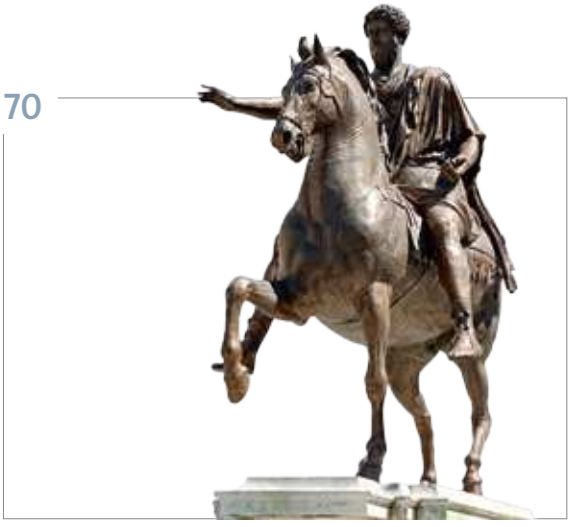
Nobelpreis für Chemie
Struktur und Funktion des Adrenalinrezeptors.

Nobelpreis für Wirtschaftswissenschaften
Kooperative Spieltheorie und Marktdesign.

SPRINGERS EINWÜRFE
Schuldig oder krank?
Vor Gericht sind Gehirn und Geist nicht das Gleiche.

44


58

70


BIOLOGIE & MEDIZIN

▸ 44 **Biologie des Blackouts**
Amy Arnsten, Rajita Sinha und Carolyn Mazure
Unter starkem Stress können Hirnregionen ausfallen, die uns zu rationalem Verhalten befähigen. Dann geben wir primitiven Impulsen nach.

PHYSIK & ASTRONOMIE

▸ 58 **Der lange Weg zum künstlichen Sonnenfeuer**
Gerhard Samulat
Die Kernfusion könnte in einigen Jahrzehnten einen beträchtlichen Teil des Energiebedarfs der Menschheit decken. Doch ob das klappt, ist ungewiss.

SCHLICHTING!
68 **Weihnachtliche Reflexionen**
H. Joachim Schlichting
In fraktalen Reflexionsmustern spiegelnder Glaskugeln erscheinen unendlich viele »Weihnachtsbäume«.

MENSCH & KULTUR

70 **Goldene Zeiten am Limes**
Kati Bott, Frank Willer und Susanne Willer
Bronzestatuen von Kaisern und Göttern signalisierten Roms Macht auch am Rand des Imperiums. Die eingesetzten Vergoldungstechniken überraschen Metallurgen.

76 **Die Vermessung des Glücks**
Joachim Weimann, Ronnie Schöb und Andreas Knabe
Höheres Einkommen verheißt mehr Glück. Doch fühlen wir uns auch glücklicher, wenn wir reicher werden?

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN
82 **Verkuppeln auf Mathematisch**
Dominique Dumont
Stabile Ehen durch den Algorithmus von Gale und Shapley.

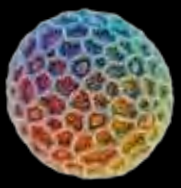
▸ 30

TITELTHEMA

Allergien – Geißel des 21. Jahrhunderts

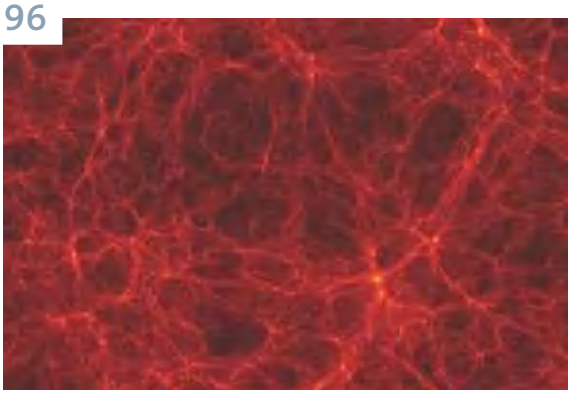
Allergien nehmen dramatisch zu; 30 bis 40 Prozent der Weltbevölkerung sind inzwischen davon betroffen. Unsere neue Serie gibt einen Überblick über den aktuellen Wissensstand.

31 Der atopische Marsch
34 Ursachenforschung
38 Lebensmittelallergie
42 Neurodermitis



88

96



ERDE & UMWELT

ERDE 3.0

88 **Frühwarnsystem für bedrohte Welten**
Carl Zimmer
Mit Hilfe von Simulationen wollen Forscher vorhersagen, ob überlastete Ökosysteme bald zusammenbrechen.

TECHNIK & COMPUTER

▸ 96 **Das Universum in der Kiste**
Brian Hayes
Das Programm »Bolshoi« bildet die Entwicklung des Kosmos über 14 Milliarden Jahre mit acht Milliarden Einzelmassen nach.

SONDERTEIL NACH SEITE 104

»Wissenschaft verstehen – Die Preisträger 2012«

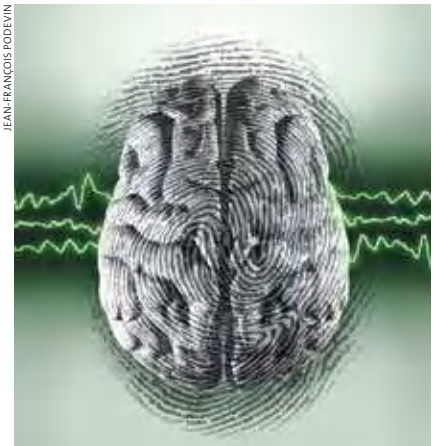
»Erklärt uns eure Arbeit so, dass wir sie verstehen. Begeistert uns!« Diesen Aufruf richteten das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ in Leipzig und »Spektrum der Wissenschaft« an junge Forscherinnen und Forscher, die sich mit umweltrelevanten Themen auseinandersetzen.

105 **Rezensionen**
Tim Flach: Ganz nah • *Charles Duhigg:* Die Macht der Gewohnheit • *Bernhard Kegel:* Ein tiefer Fall • *Hansjörg Küster:* Die Entdeckung der Landschaft • *Anna Frebel:* Auf der Suche nach den ältesten Sternen • *Andreas Heuer:* Der perfekte Tipp • *Thomas Martin et al. (Hg.):* Paläontologie

94 **Wissenschaft im Rückblick**
Vom Steinzeit-Brot zur Welternährung

110 **Vorschau**

Titelmotiv: Corbis / Science Faction / David Scharf [M]
Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▸ gekennzeichnet.



JEAN-FRANÇOIS PODEVIN

Kein Fingerabdruck ist wie der andere. Genauso stimmen keine zwei Gehirne in Aufbau und Funktion völlig überein.

BRIEFE AN DIE REDAKTION

... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf www.spektrum.de/leserbriefe

Spektrum der Wissenschaft
Leserbriefe / Sigrid Spies
Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

Die vollständigen Leserbriefe und Antworten der Autoren finden Sie ebenfalls unter: www.spektrum.de/leserbriefe

Gensprungaktivität und Vernetzungsdichte

Die Neurobiologen Fred H. Gage und Alysson R. Muotri sehen in so genannten springenden Genen, die auch noch im Erwachsenengehirn Mutationen hervorrufen, einen Grund für die Anpassungsfähigkeit unseres Denkorgans. (»Was jedes Gehirn einzigartig macht«, Oktober 2012, S. 22)

Dieter Eichrodt, Glengarriff (Irland): Zwar enthält jede Nervenzelle, ebenso wie jede Zelle jedes anderen Gewebetyps, das vollständige Genom eines Organismus. Aber die Autoren weisen zu Recht darauf hin, dass es das Verschaltungsmuster der rund 100 Milliarden Nervenzellen ist und nicht das einzelne Neuron, das die Unterschiede zwischen Gehirnen ausmacht. Der Gensprungmechanismus, den die Autoren beschreiben, ist ein innerzellulärer Prozess, der in allen betroffenen Neuronen parallel, aber jeweils zufallsbedingt, also völlig unkoordiniert abläuft. Dann stellt sich die Frage, wie davon eine Nettowirkung auf den Phänotyp ausgehen kann. Auf welche Weise werden die innerzellulären Gensprünge – wenn überhaupt – im Verschaltungsmuster der Nervenzellen wirksam? Andererseits deuten die Autoren an, dass die Gensprünge, zunächst ohne Einfluss auf das Verschaltungsmuster, einzelne Neurone hervorbringen können, »mit deren Hilfe das Gehirn ungewohnte Herausforderungen besonders gut bewältigen kann«. Könnte es im Gegensatz hierzu, aber im Einklang mit der Verschaltungshypothese, sein, dass eine insgesamt höhere Gensprungaktivität in einer bestimmten Gehirnregion dort zu einer korrelierten höheren Vernetzungsdichte der Neurone führt? Doch eine solche Außenwirkung des stets nur innerzellulären Gensprungmechanismus bedürfte noch der Erklärung.

Risiko Fehldiagnose

Der Onkologe Marc B. Garnick rät dazu, die Krebsbehandlung nach einem positiven PSA-Test sorgfältig abzuwägen. (»Streit um die Prostatakrebs-Früherkennung«, Oktober 2012, S. 28)

Dr. med. Josef Peter Kosek, Rietberg: Der hervorragende Beitrag von Marc B.

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.)
Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser (Monatshefte), Dr. Gerhard Trageser (Sonderhefte)
Redaktion: Thilo Körkel, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online-Koordinator), Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke, Antje Findeklee (Bild des Monats); E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Editor-at-Large: Dr. Reinhard Breuer
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Referentin des Chefredakteurs: Kirsten Baumbusch
Redaktionsassistenz: Erika Eschwei
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax -751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114
Verlagsleiter: Richard Zinken
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Andreas Nestke, Katharina Schulz.
Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner des Nationalen Instituts für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik). Das NaWik ist ein Institut der Klaus Tschira Stiftung gGmbH und des Karlsruher Instituts für Technologie. Wissenschaftlicher Direktor des NaWik ist Spektrum-Chefredakteur Dr. Carsten Könneker.

Bezugspreise: Einzelheft € 7,90 (D/A) / € 8,50 (L) /sFr. 14,–; im Abonnement € 84,– für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. E-Paper € 60,– im Jahresabonnement (Vollpreis); € 48,– ermäßigter Preis auf Nachweis. Zahlung sofort nach Rechungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70).
Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e.V. erhalten SdW zum Vorzugspreis.

Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Bereichsleitung Anzeigen: Marianne Dölz; Anzeigenleitung: Patrick Priesmann, Tel. 0211 887-2315, Fax 0211 887 97-2315; verantwortlich für Anzeigen: Christian Herp, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887 2481, Fax 0211 887-2686
Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 33 vom 01.01. 2012.
Gesamtherstellung: L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2012 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
75 Varick Street, New York, NY 10013-1917
Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven Inchcoombe, Vice President, Operations and Administration: Frances Newburg, Vice President, Finance, and Business Development: Michael Florek, Managing Director, Consumer Marketing: Christian Dorbandt, Vice President and Publisher: Bruce Brandfon

Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

Garnick lässt sich noch wie folgt erweitern: Die Tastuntersuchung der Prostata erhöht ihrerseits das PSA im Blut. Zuerst tasten und anschließend, eventuell erst nach einer oder mehreren Stunden, eine Blutabnahme vorzunehmen, kann einen falsch erhöhten Blutwert des PSA zur Folge haben. Dies ist besonders dramatisch, wenn bereits ein Prostatakarzinom diagnostiziert ist. Der künstlich erhöhte PSA-Wert kann dann zu einer möglicherweise zu diesem Zeitpunkt nicht angebrachten Therapie führen. In diesen Fällen (kein Karzinom oder bereits bewiesenes Karzinom) läge ein Fehlergebnis mit konsekutiver Fehleinschätzung vor, und damit eine Fehldiagnose.

Stoßweises Ausatmen

Laut dem Physiologen Michael J. Parks scheint das Zwerchfell zu bestimmen, wie lange wir die Luft anhalten können. (»Warum ist Luftanhalten so schwer?«, Oktober 2012, S. 36)

Ernst Sauerwein, München: Der Autor dürfte mit seiner These richtig liegen. Denn wenn man die Luft eine Zeit lang angehalten hat, genügt schon ein klein wenig ausatmen, damit der Atemdrang sofort spürbar nachlässt, offenbar auf Grund der mit dem teilweisen Ausatmen verbundenen Zwerchfellbewegung. Das kann man leicht selbst ausprobieren.

In der Konsequenz lässt sich durch stoßweises Ausatmen kleiner Atemvolumina die Stoppuhr für den Atemzwang immer wieder auf null zurücksetzen, bis keine Luft zum Ausatmen mehr vorhanden ist. Ich glaube mich erinnern zu können, mit zusätzlichem vorherigem Hyperventilieren und mehrmaligem tiefem Ausatmen (um die verbrauchte Restluft vollständig aus der Lunge zu entfernen) in jungen Jahren auf zirka drei Minuten vom Luftanhalten über das Ausatmen bis zum nächsten Luftholen gekommen zu sein. Damals war ich im Glauben, dass diese drei Minuten unkritisch seien. Nach der Lektüre des Artikels ist mir jetzt klar geworden, dass man dabei körpereigene Kontrollmechanismen überlistet, wobei unter Umständen kritisch niedrige Sauerstoffwerte im Blut auftreten. Deswegen sei diese Methode auch nicht zur Nachahmung empfohlen, jedenfalls nicht ohne ärztliche Aufsicht!

Interessant wäre zu wissen, was die asiatischen Perlentaucher anstellen, um ihre langen Tauchzeiten zu erreichen. Durch die niedrige Temperatur und den Wasserdruck sind die Bedingungen natürlich andere.

Errata

»Von der Schipiste in den abstrakten Wahrscheinlichkeitstraum«, November 2012, S. 82

Auf S. 85 heißt es, Stalin habe 1954 Andrei Kolmogorow und zwei anderen Mathematikern eine Reise ins Ausland erlaubt. Stalin ist jedoch schon 1953 gestorben. Nicht Stalin, sondern dessen Nachfolger Georgi Maximilianowitsch Malenkow (Vorsitzender des Ministerrats) genehmigte die Reise von Kolmogorow.

»Das geheimnisvolle Innenleben der Zellen«, November 2012, S. 42

In der Grafik auf S. 43 sind uns leider zwei Beschriftungsfehler unterlaufen. Hier die korrekte Darstellung.

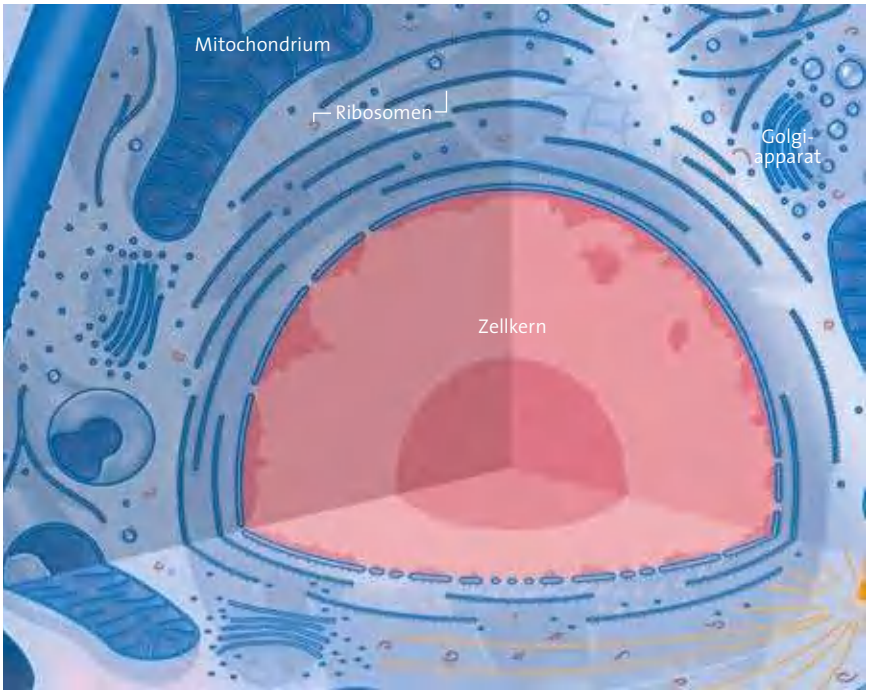
FOLGEN SIE UNS IM INTERNET

facebook
www.spektrum.de/facebook

YouTube
www.spektrum.de/youtube

studiVZ
www.spektrum.de/studivz

twitter
www.spektrum.de/twitter



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ART FOR SCIENCE

Eine typische Lehrbuchzeichnung des Zellinneren zeigt neben dem Kern (im Bild: rot) verschiedene Organellen, wie die Mitochondrien, den Golgiapparat und die Ribosomen (die Proteinfabriken; im Bild: orange Punkte). Doch inzwischen haben Biologen darüber hinaus noch viele weitere intrazelluläre Strukturen entdeckt – und laufend werden es mehr.

BIOLOGIE

Maus entkommt durch Fellabwurf

Um den Krallen oder Zähnen von Fressfeinden zu entschlüpfen, bedienen sich ostafrikanische Stachelmäuse eines radikalen Tricks: Sie werfen ganze Hautpartien ab. Das haben Forscher um Ashley Seifert von der University of Florida beobachtet. Bisher war die Fähigkeit, bei Gefahr einen Körperteil abzustoßen – die so genannte Autotomie – ‚vor allem von Eidechsen, Salamandern und Gliederfüßern bekannt.

Die untersuchten Stachelmäuse (*Acomys kempi* und *Acomys percivali*) entledigen sich beim Versuch, Feinden zu entkommen, nicht nur ihrer Stachelborsten und Teile des Schwanzes, sondern auch größerer Hautstücke bis hin zu 60 Prozent des Rückenfells. Dabei entstehen enorme Wunden. Jedoch erneuern sich die fehlenden Partien mitsamt Haaren binnen weniger Wochen und narbenfrei.

In der Regel sind Säuger nur als Embryos in der Lage, komplexe Gewebe von Grund auf neu wachsen zu lassen. Denn eine Voraussetzung dafür ist, dass die beteiligten Zellen intensiv miteinander kommunizieren. In der Haut von erwachsenen Tieren erschwert jedoch die kollagenhaltige Basalmembran den Informationsaustausch zwischen Oberhaut und tiefer gelegener Lederhaut.

Bei verletzten Stachelmäusen überzieht sich die Wunde extrem schnell mit einem Deckgewebe. Darunter vermehren sich undifferenzierte Vorläuferzellen stark, zunächst ohne dass die zerstörte Basalmembran regeneriert wird. Das ermöglicht die Bildung neuen Gewebes aus den Vorläuferzellen, und die Tiere können Haut, Haare, Knorpel und Fettzellen vollständig ersetzen. Die zu Grunde liegenden molekularen Prozesse wollen die Forscher nun genauer untersuchen, auch im Hinblick auf mögliche Anwendungen in der Medizin.

Nature 489, S. 561–565, 2012

ASHLEY W. SEIFERT, UNIVERSITY OF FLORIDA

Stachelmäuse verdanken den Namen ihren Borstenhaaren auf dem Rücken.

Spektrum DER WISSENSCHAFT DIE WOCHE

Mehr aktuelle Analysen und Spektrogramme!

Lesen Sie in
Spektrum DER WISSENSCHAFT DIE WOCHE

– Exoplaneten: Die Jagd nach Leben ist eröffnet
– Umwelt: Geoengineering auf eigene Faust
– Klimazwist: »Die Risiken wurden weichgespült«

www.spektrum.de/diewoche

Deutschlands erstes wöchentliches Wissenschaftsmagazin!

ASTRONOMIE

Wasser auf dem Mond – dank der Sonne

Die Wasservorkommen auf dem Mond stammen nicht nur von Meteoriten und Kometen, sondern sind zum Teil unter Mitwirkung des Sonnenwinds entstanden. Zu diesem Schluss kommen Forscher um Yang Liu von der University of Tennessee, USA. Die Wissenschaftler untersuchten glasähnliche Kügelchen aus geschmolzenem Staub von der Mondoberfläche, in denen winzige Mengen an Wasser eingeschlossen waren. Das Material war bei verschiedenen Apollomissionen zur Erde gebracht worden.

Mit spektroskopischen und spektrometrischen Verfahren bestimmten die Forscher das Verhältnis von Wasserstoff zu seinem schweren Isotop Deuterium in den Proben. Der gemessene Wert war deutlich höher als für Kometen und wasserhaltige Meteoriten typisch. Das spricht dafür, dass das Wasser im Mondstaub mit Wasserstoffkernen (Protonen) aus dem Sonnenwind angereichert ist. Denn dieser enthält kaum Deuteriumkerne, da unser Zentralgestirn sie schon fast vollständig mit leichtem Wasserstoff zu Helium verschmolzen hat.

Zusammen mit anderen Befunden deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die Wasserstoffkerne des Sonnenwinds mit sauerstoffhaltigen Verbindungen im Mondstaub reagieren, wobei unter anderem Wasser entsteht. Dies war früher von einigen Wissenschaftlern angezweifelt worden. Der Mechanismus bringe möglicherweise auch auf anderen atmosphärenlosen Himmelskörpern Wasser hervor, etwa auf dem Merkur oder dem Asteroiden Vesta, vermuten die Wissenschaftler.

Nature Geoscience 10.1038/ngeo1601, 2012

MATERIALWISSENSCHAFT

Bioverträgliche Elektronik löst sich im Körper auf

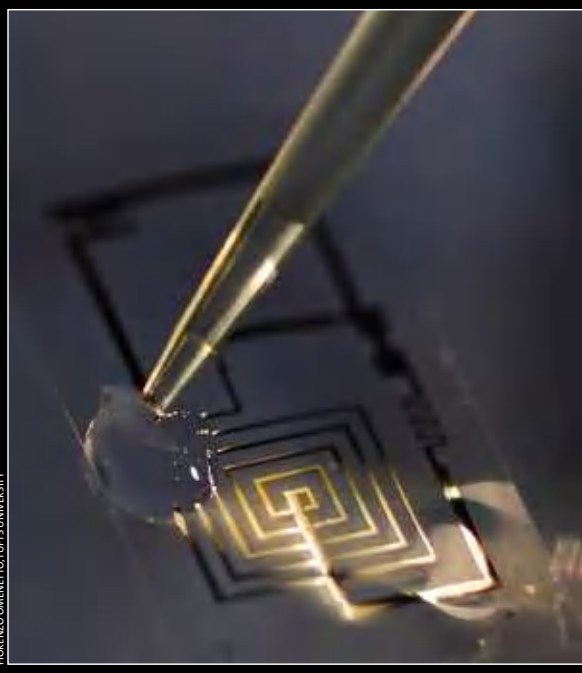
Ein internationales Forscherteam hat biologisch abbaubare elektronische Schaltungen entwickelt, die sich nach einer vorher bestimmten Zeit von selbst auflösen. Mögliche Einsatzgebiete seien medizinische Implantate, Umweltsensoren oder Bauteile für schnelllebige Mobilgeräte, schlagen Suk-Won Hwang von der University of Illinois in Urbana-Champaign (USA) und seine Kollegen vor.

Als Trägermaterial für die Schaltungen dient Seide. Elektroden, Leiter, Widerstände und Spulen bestehen aus Magnesium. Dioden und Transistoren sind aus ultradünnen Siliziumschichten gefertigt. Schon geringe Mengen Wasser reichten aus, um solche Strukturen aufzulösen, berichten die Wissenschaftler.

Wie schnell sich die Elektronik zersetzt, hängt von der Dicke der Teile ab und davon, ob die Schaltung mit Seide oder Magnesiumoxid umhüllt ist. Indem die Forscher verschiedene Materialstärken und Umhüllungen einsetzten, konnten sie die Verfallszeit auf Minuten, Stunden, Tage oder Wochen festlegen. Zudem entwickelten sie ein Computermodell, das den Auflösungsprozess präzise vorhersagt.

Zu Testzwecken stellten die Wissenschaftler biomedizinische Implantate her, die sie in Mäuse und Ratten einpflanzten. Nach je drei Wochen hatten sich die Implantate weit gehend aufgelöst oder waren vom Gewebe aufgenommen worden. Bei Menschen könnten solche Schaltungen etwa dazu dienen, vorübergehend Vitalfunktionen zu überwachen oder Medikamente kontrolliert in den Körper abzugeben.

Science 337, S. 1640–1644, 2012



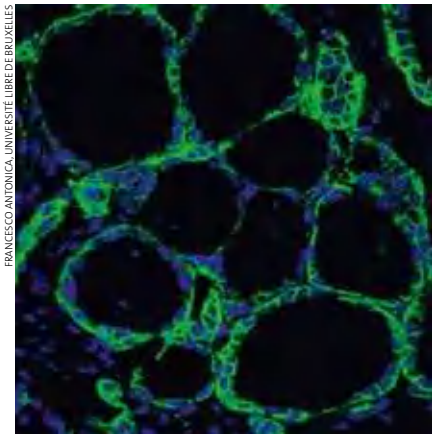
FIORENZO OMENETTO, TUFTS UNIVERSITY

Spule und Leiterbahnen aus Magnesium, aufgebracht auf Seide. Bei Wasserkontakt lösen sich die Strukturen auf.

MEDIZIN

Künstliche Schilddrüse aus Stammzellen

Wissenschaftler um Sabine Costagliola von der Université Libre in Brüssel haben aus embryonalen Stammzellen der Maus schilddrüsenähnliches Gewebe erzeugt. Sie brachten die Stammzellen dazu, zwei Eiweiße in außergewöhnlich hoher Menge herzustellen: NKX2-1 und PAX8. Beide Stoffe gehören zu den Transkriptionsfaktoren – Proteinen, die die Aktivität von Genen regeln. Daraufhin wandelten sich die Stammzellen in so genannte Thyreozyten um. Das sind Zellen der Schilddrüse, die im intakten Organ normalerweise Hormone herstellen. Die anschließende Behandlung mit dem Hormon Thyreotropin bewirkte, dass sich die Zellen zu kleinen Bläschen anordneten, wie es dem natürlichen Aufbau des Organs entspricht.



FRANCESCO ANTONICA, UNIVERSITÉ LIBRE DE BRUXELLES

Künstlich erzeugte Schilddrüsenzellen haben sich hier nach hormoneller Behandlung zu kleinen Bläschen angeordnet. In Mäuse verpflanzt, gaben sie das Schilddrüsenhormon Thyroxin ins Blut ab.

Nun pflanzten die Wissenschaftler das Gewebe in Mäuse ein, wo es sich als funktionsfähig erwies: Es nahm Jodverbindungen auf und gab Schilddrüsenhormone ins Blut ab. Einige Zelltypen der Schilddrüse, etwa die Calcitonin produzierenden C-Zellen, seien bei der Behandlung jedoch nicht entstanden, räumen die Forscher ein.

Fehlfunktionen der Schilddrüse zählen zu den häufigsten angeborenen Krankheiten des Hormonsystems. Betroffen ist etwa 1 unter 2000 Kindern. Die neuen Versuchsergebnisse machten Hoffnung auf mögliche Stammzelltherapien, schreiben die Forscher.

Nature 10.1038/nature11525, 2012

BIOLOGIE

Schleimpilze orientieren sich an eigener Spur

Obwohl Schleimpilze kein räumliches Erinnerungsvermögen haben, vermeiden sie überflüssige Wege, indem sie ihrer eigenen Schleimspur ausweichen. Sie nutzen den Glykoproteinschleim damit gewissermaßen als ausgelagertes Gedächtnis.

Forscher der University of Sydney (Australien) testeten das Orientierungsvermögen des Schleimpilzes *Physarum polycephalum*, eines vielkernigen Einzellers. Sie setzten ihm eine Zuckerlösung vor, platzierten diese allerdings hinter einer u-förmigen Barriere. Somit konnte der Pilz die Nahrungsquelle nicht direkt erreichen, indem er dem Konzentrationsgradienten folgte, sondern er musste einen Weg um das Hindernis finden. 24 Exemplare durften sich auf normalen Nährböden vortasten. Weitere 24 Individuen mussten mit erschwerten Bedingungen zurechtkommen: Ihre Nährböden hatten die Forscher zuvor mit Pilzschleim benetzt, so dass die Einzeller ihre eigene Spur nicht mehr erkennen konnten.

Von den Schleimpilzen der ersten Gruppe erreichten innerhalb der Versuchsdauer von fünf Tagen alle außer einem das Ziel. In der zweiten Gruppe fanden dagegen nur acht den Weg. Weder das Zuckerkonzentrationsgefälle noch das Ausbreitungstempo der Pilze war durch die Benetzung des Untergrunds beeinflusst worden. Vielmehr hatten die Einzeller, die sich nicht an der eigenen Spur orientieren konnten, wesentlich mehr Zeit in bereits erkundeten Bereichen verschwendet. Demnach ermöglicht der Schleim den Pilzen ein effizienteres Navigieren durch eine komplexe Umgebung.

AUDREY DUSSUTOUR, CRCA, UNIVERSITÉ PAUL SABATIER

Der Schleimpilz *Physarum polycephalum* breitet sich auf einem Nährboden aus, indem er verzweigte Ausläufer bildet. Das Geflecht bewegt sich auf Nahrungsquellen zu und kann dabei auch schwierige Hindernisse umgehen.

PNAS 109, S. 17490–17494, 2012

GEOLOGIE

Neue Erdplatten entstehen

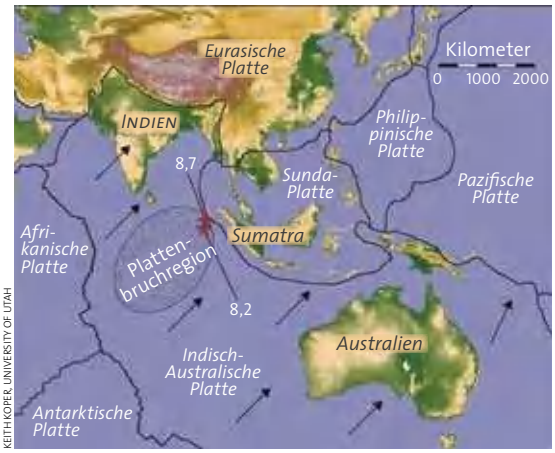
Unter dem Indischen Ozean, westlich von Sumatra, zerbricht die Indisch-Australische Platte in mehrere Teile. Neue Belege dafür haben nun Forscher um Thorne Lay von der University of California Santa Cruz (USA) gefunden. Die Wissenschaftler analysierten Aufzeichnungen der seismischen Wellen eines schweren Erdbebens, das sich am 11. April 2012 westlich vor Nordsumatra ereignet hatte. Demzufolge brach die Erdkruste damals entlang von vier Verwerfungslinien, was Erschütterungen der Stärke 8,7 auslöste. Zwei Stunden später folgte ein schweres Nachbeben der Stärke 8,2.

Noch liegen Australien und Indien auf derselben Erdplatte. Doch auf diese wirken beträchtliche Kräfte ein. Ganz im Norden drückt sie gegen die Eurasische Platte und faltet den Himalaja auf, was sie stark bremst. Weiter südlich schiebt sie sich unter die Sundaplatte. Dadurch entstehen Spannungen in ihr, die zu Beben wie dem im April führen. Voraussichtlich in einigen Millionen Jahren wird die Indisch-Australische Platte endgültig zerbrochen sein. Wo die neuen Plattengrenzen einmal exakt verlaufen werden, lässt sich noch nicht absehen. Bis dahin finden wohl noch viele weitere Erdstöße statt, schätzen die Forscher.

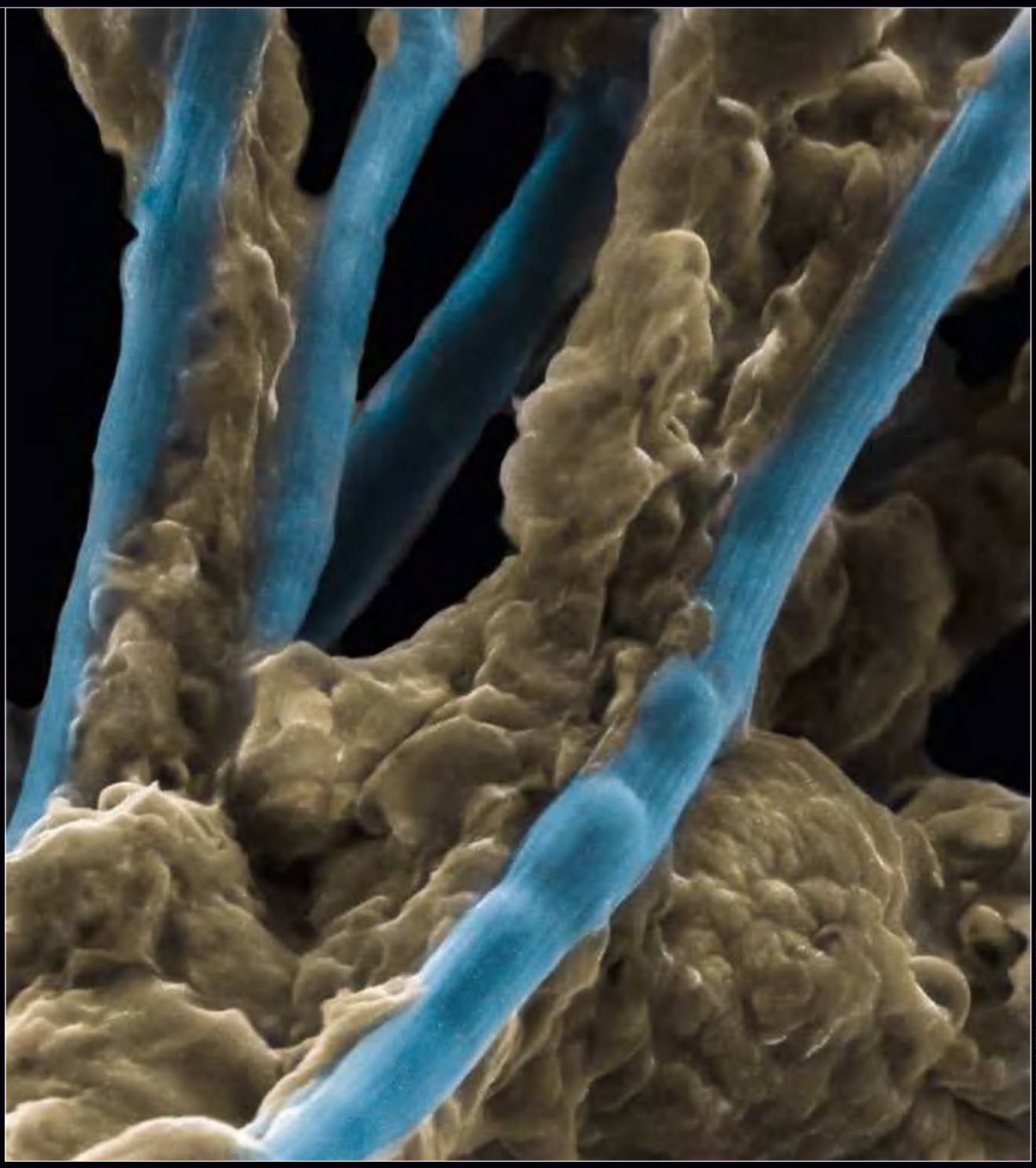
Die Erschütterung im April verlief relativ glimpflich für die Menschen in der Region. Denn im Gegensatz zum katastrophalen Erdbeben im Dezember 2004, das mehr als 200 000 Todesopfer forderte, kam es hier zu keiner größeren vertikalen Bodenbewegung unter dem Ozean, so dass verheerende Tsunamis ausblieben. Stattdessen glitten Bereiche innerhalb der Platte horizontal aneinander entlang. Bei dieser so genannten Blattverschiebung entstanden nur vergleichsweise kleine Tsunamis.

Nature 490, S. 245–249, 2012

KEITH KOPER, UNIVERSITY OF UTAH



Verlauf von Erdplattengrenzen im Indopazifik. Die Indisch-Australische Platte schiebt sich langsam unter Sumatra. Daraus resultieren Spannungen in der Erdkruste, die irgendwann zum Zerbersten der Platte führen werden. In der Bruchregion ereignete sich vergangenen April ein schweres Erdbeben der Stärke 8,7, gefolgt von einem Nachbeben der Stärke 8,2.



JIE SONG UND NILS RISGAARD-PETERSEN, AARHUS UNIVERSITET

LEBENDE STROMKABEL

Ketten von tausenden aneinandergereihten Meeresbakterien (blau) ziehen von sauerstoffreichen oberen Sedimentschichten zu sauerstofffreien Zonen darunter. Dadurch können die Mikroben auch in anaerober Umgebung mit Hilfe von Sauerstoff als Elektronenempfänger Energie aus Schwefelverbindungen gewinnen. Hierbei wandern Elektronen entlang der oft über einen Zentimeter langen Filamente nach oben – ein elektrischer Strom fließt. Die nachträglich eingefärbte rasterelektronenmikroskopische Aufnahme zeigt die rippenartige Struktur der äußeren Bakterienmembran, die entlang der gesamten Filamente röhrenartige Kanäle bildet. Da dort viele geladene Teilchen vorkommen, könnten in ihnen die Elektronen aus der Tiefe an die Oberfläche gelangen – ähnlich wie in den einzelnen Drähten eines Kabels.

Nature 10.1038/nature11586, 2012

NOBELPREIS FÜR PHYSIOLOGIE ODER MEDIZIN

Keine Einbahnstraße

Die Entwicklung kann bei Organismen nicht nur von der Stammzelle zum spezialisierten Gewebe ablaufen, sondern – mit etwas Nachhilfe – auch umgekehrt. Mit der gezielten Reprogrammierung von bereits ausgereiften Zellen revolutionierten John Gurdon und Shinya Yamanaka die Stammzellforschung und wurden dafür mit dem Nobelpreis für Medizin oder Physiologie geehrt.

VON STEFANIE REINBERGER

WELLCOME LIBRARY, LONDON

CENTER FOR IPS CELL RESEARCH AND APPLICATION, KYOTO UNIVERSITY

Sir John B. Gurdon (links) bewies, dass ein normaler Zellkern die Informationen für den Bau aller Körperzellen enthält. **Shinya Yamanaka** reprogrammierte reife Zellen zu Stammzellen, aus denen sich eine ganze Maus entwickeln kann.

Mit Dogmen zu brechen, erfordert Mut sowie eine gehörige Portion Selbstbewusstsein – und es scheint eine gute Voraussetzung dafür zu sein, im Lauf einer wissenschaftlichen Karriere den Nobelpreis zu erhalten. Um nur zwei Beispiele von vielen zu nennen: Barbara McClintock, die den Preis 1983 bekam, hatte 1951 die Existenz springender Gene nachgewiesen, so genannter Transposonen, und damit an der Lehrmeinung gerüttelt, dass Gene grundsätzlich fest im Erbgut verankert seien. Die Preisträger von 1975 – Howard Temin, David Baltimore und Renato Dulbecco – brachten das lange Zeit gültige Dogma der Molekularbiologie zum Einsturz, genetische Information werde grundsätzlich nur von der DNA über die RNA zum Protein transportiert. Die Entdeckung des Enzyms reverse Transkriptase belegte, dass der Übersetzungsprozess ebenfalls umgekehrt funktioniert, nämlich von der RNA zur DNA.

Auch in diesem Jahr ging der Nobelpreis für Medizin oder Physiologie an zwei Forscher, die einen Glaubenssatz kippten – und so eine weitere vermeintliche biologische Einbahnstraße für den Gegenverkehr öffneten. Der Brite John Gurdon und der Japaner Shinya Yamanaka erhielten die Auszeichnung für ihre Entdeckung, dass sich ausgereifte Körperzellen in ein Stadium zurückversetzen lassen, in dem sie sich wie embryonale Stammzellen verhalten und theoretisch alle Entwicklungswege einschlagen können. Fachleute sprechen von Reprogrammierung, die resultierenden Zellen nennen sie induzierte pluripotente Stammzellen (iPS). »Dass beide den Preis verdient haben, war allen im Feld klar«, sagt der Bonner Stammzellforscher Oliver Brüstle und spricht von einem großen Tag für sein Fachgebiet.

Quelle für Ersatzgewebe

Gurdon und Yamanaka widerlegten mit ihren Arbeiten nicht nur die lange Zeit gültige Ansicht, wonach sich Zellen grundsätzlich lediglich in eine Richtung entwickeln können – nämlich von der Stammzelle zur spezialisierten Körperzelle. Sie legten auch den Grundstein für die Medizin der Zukunft: Die iPS könnten eines Tages zur Quelle für Ersatzgewebe werden, um Organe gezielt zu reparieren.

Davon ahnte Gurdon freilich noch nichts, als er 1962 mit seinen Ergebnissen an die Öffentlichkeit ging. In einem bahnbrechenden Experiment war es ihm gelungen, die Entwicklung bei Froschzellen umzukehren (siehe Spektrum der Wissenschaft 2/1980, S. 60). Dazu hatte er die Zellkerne von Eizellen der Amphibien entfernt und durch solche aus Kaulquappen ersetzt. Tatsächlich war daraus neuer Froschnachwuchs entstanden. Auch wenn das Experiment bei Weitem nicht jedes Mal klappte, so gelang dem Forscher damit doch der Nachweis, dass der Kern einer reifen Körperzelle noch die genetische Information enthält, die zum Bau sämtlicher Zelltypen nötig ist. Und: Diese Information lässt sich auch abrufen.

Die Öffentlichkeit nahm allerdings in den 1960er Jahren noch relativ wenig Notiz von dem Experiment. »Zu diesem Zeitpunkt gab es nahezu keine Aussicht auf einen direkten therapeutischen Nutzen«, sagt Gurdon auf nobelprize.org. Genau das interessiere aber in der Regel am meisten. Außerdem sei es ein weiter Weg gewesen, bis seine Daten schließlich wirklich anerkannt wurden, erinnert sich der 79-Jährige, der nach eigenen Angaben noch heute selbst im Labor steht. Vom eigentlichen Experiment, das er bereits 1958 durchführte, bis zur Veröffentlichung verstrichen mehrere Jahre. Einer der Gründe ist sicherlich gewesen, dass die Erfinder der Technik des Kerntransfers, Robert William Briggs und Thomas Joseph King, bei ähnlichen Versuchen zum gegenteiligen Ergebnis gekommen waren. Warum sollte man da einem Jungforscher wie Gurdon Glauben schenken?

Das alles mag auch mit dazu beigetragen haben, dass zwischen Publikation und Preis ein halbes Jahrhundert

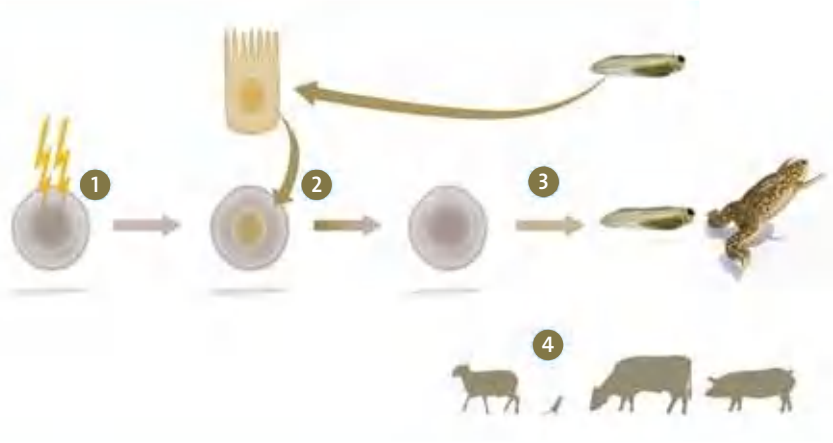
verstrich. »Ich habe zum Glück lange genug gelebt«, sagt der Forscher, der lachend berichtet, er habe zunächst geargwöhnt, jemand wolle einen Scherz mit ihm treiben, als ihn der Anruf aus Stockholm erreichte.

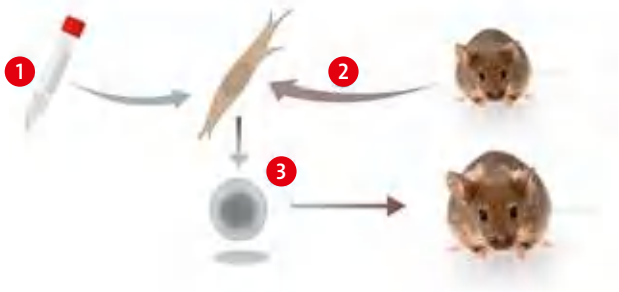
Dabei war schon einmal Gurdons Entdeckung schlagartig ins Rampenlicht geraten: 1997 schuf der britische Embryologe Ian Wilmut das Klonschaf Dolly, und zwar im Wesentlichen nach Gurdons Methode. Allerdings blieb es lange Zeit schleierhaft, warum die Sache überhaupt funktionierte – und warum die Reprogrammierung nur manchmal klappte und dann wieder nicht. Eine Menge Fragen waren noch offen, als der zweite Preisträger, Shinya Yamanaka, die Bildfläche betrat. Der Japaner wurde übrigens 1962 geboren: im selben Jahr, in dem Gurdons Arbeit schließlich veröffentlicht wurde. Yamanaka fahndete ursprünglich nach Proteinen, die dafür sorgen, dass eine embryonale Stammzelle in ihrem pluripotenten Zustand verbleibt. Dann stellte er sich die Frage, ob solche Moleküle nicht auch eine ausdifferenzierte Zelle in eine pluripotente Stammzelle zurückverwandeln könnten.

Yamanaka identifizierte schließlich vier Proteine – Myc, Oct3/4, Sox2 und Klf4 genannt –, die gemeinsam genau diese Fähigkeit besaßen (siehe Spektrum der Wissenschaft 8/2007, S. 16). Es handelt sich dabei um so genannte Transkriptionsfaktoren, also Moleküle, die mithelfen, dass bestimmte Gene aktiviert werden. Mehr als diese vier braucht es demnach nicht, um das Entwicklungsstadium einer Zelle wieder auf Start zu stellen. Der Forscher brachte die Erbinformation für die Faktoren per Gentransfer in Fibroblasten von Mäusen ein. Auf diese Weise verwandelte er die ausdifferenzierten Nagerzellen in induzierte pluripotente Zellen, aus denen letztlich wieder eine komplette Maus heranreifen konnte. Das Rezept für die gezielte Reprogrammierung war gefunden. Den Grundstein für seinen Erfolg habe aber Gurdon gelegt, betont Yamanaka. Daher fühle er sich besonders geehrt, nun gemeinsam mit dem älteren Kollegen ausgezeichnet zu werden.

»Die Zellreprogrammierung erlaubt es, aus Zellen von Erwachsenen pluripotente Stammzellen herzustellen – Alleskönner, die sich in unbegrenzter Zahl in jeden Körperzelltyp ausreifen lassen«, erklärt Oliver Brüstle. Damit könnten sie zum idealen Ersatzteillager werden, um krankes Gewebe durch gesundes zu ersetzen. Egal ob Herz-, Gehirn- oder Pankreaszellen benötigt werden: Alles sollte sich aus den reprogrammierten Tausendsassas herstellen und einpflanzen lassen – und zwar ohne Absto-

John. B. Gurdon zerstörte den Kern einer Froscheizelle durch Bestrahlung (1) und ersetzte ihn durch den Kern einer ausdifferenzierten Kaulquappenzelle (2). Die meisten der so manipulierten Eier waren danach nicht lebensfähig – doch einige begannen sich zu teilen und wuchsen sogar zu gesunden Kaulquappen heran (3). Spätere Kerntransferexperimente brachten auch geklonte Säugetiere hervor; das erste war das Schaf »Dolly« (4).





Shinya Yamanaka brachte vier spezielle Transkriptionsfaktoren (1) in Hautzellen vom Mäusen ein (2), die dadurch zu pluripotenten Stammzellen umprogrammiert wurden: Zellen, aus denen sich wieder alle möglichen Zelltypen einer Maus entwickeln können. Er nannte sie induzierte pluripotente Stammzellen (iPS; 3).

Heute lassen sich auch menschliche iPS-Zellen herstellen und zur Produktion von Nerven-, Herz- oder Leberzellen nutzen.

THE NOBEL COMMITTEE FOR PHYSIOLOGY OR MEDICINE / MATTIAS KARLÉN

ßungsrisiko, da der Zellersatz schließlich vom Patienten selbst stammt.

So lautet zumindest die Theorie. In der Praxis könnte die Sache kompliziert werden. Bei einem Experiment mit Mäusen von 2011 erkannte das Immunsystem den zellulären Nachschub aus iPS doch als fremd und attackierte ihn *(Nature 474, S. 212, 2011)*. Andere Wissenschaftler beobachteten eine genetische Instabilität der reprogrammierten Zellen. Das kann sie entarten lassen und zu Tumoren führen. Stammzellforscher werden also noch viel Arbeit leisten müssen, bis Gurdons und Yamanakas Erkenntnisse eines Tages Patienten zugutekommen können. Dafür, dass es irgendwann so weit sein wird, setzt sich Yamanaka ein. »Ich will diese Technologie in die Klinik bringen«, sagt der japanische Forscher, der seine Laufbahn ursprünglich als Chirurg begann – als unbegabter, wie er zugibt, weshalb er in die Forschung gewechselt sei. Dennoch fühle er sich noch immer als Arzt.

Auch wenn kranke Menschen derzeit noch nicht direkt von der Reprogrammierung profitieren – die Technologie nutzt nicht allein der Grundlagenforschung. Vielmehr eröffne sie bereits jetzt ungeahnte Perspektiven für die Medizin, betont Stammzellforscher Brüstle: »Erkrankungen und Wirkstoffe lassen sich nun direkt und in vielen Fällen erstmals an den jeweils betroffenen menschlichen Zellen studieren.« Dazu nämlich können sich Forscher nun den jeweils benötigten Zelltyp in der Kulturschale heranziehen – ohne auf die umstrittenen embryonalen Stammzellen zurückzugreifen, deren Gewinnung in Deutschland verboten ist. »Es steht außer Frage, dass die Arbeiten von Shinya Yamanaka und John Gurdon zur Zellreprogrammierung die Stammzellforschung revolutioniert haben«, lautet daher auch die Einschätzung des Bonner Experten.

Stefanie Reinberger ist promovierte Biologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Köln.

NOBELPREIS FÜR PHYSIK

Auszeichnung für Quantendompteure

Zwei Forschern gelang es in unterschiedlichen Versuchsreihen, das Verhalten von Quantensystemen in ungeahnten Details zu analysieren. Sie bahnten damit auch den Weg zum Quantencomputer.

VON OLIVER MORSCH

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY

CNRS PHOTOTHÈQUE / CHRISTOPHE LEBEDINSKY

David J. Wineland (links) schuf mit seinen Arbeiten die Voraussetzung für extrem genaue Uhren und Quantencomputer. **Serge Haroche** fing Photonen ein und nahm Messungen an ihnen vor, ohne sie dabei zu vernichten.

»Gibt es Quantensprünge?« Mit dieser Frage überschrieb der österreichische Physiker Erwin Schrödinger 1952 einen einflussreichen Fachaufsatz. Schrödinger (1887–1961) war einer der Väter der Quantenmechanik, der zufolge die möglichen Energiezustände eines physikalischen Systems nicht kontinuierlich verteilt, sondern gequantelt sind. Will das System seinen Energiezustand ändern, so muss es in einen anderen »springen«. Außerdem kann es unter bestimmten Umständen in mehreren Zuständen gleichzeitig existieren, und erst eine experimentelle Beobachtung führt dann dazu, dass es sich für einen davon entscheidet.

In zahlreichen Experimenten haben Physiker seit den 1930er Jahren gezeigt, dass die Quantenmechanik auf dieser Grundlage sehr exakte Vorhersagen macht und Phänomene erklären kann, die mit der von Newton begründeten klassischen Mechanik nicht vereinbar sind. Dennoch war es niemandem geglückt, Quantensystemen tatsächlich beim Springen zuzusehen. Dazu wäre es nötig gewesen, etwa einzelne Atome, die den Gesetzen der Quantenphysik unterliegen, einzufangen und genau zu beobachten. Und das, schrieb Schrödinger in besagtem Aufsatz, sei so unmöglich wie das Züchten eines Dinosauriers im Zoo. Die Nobelpreisträger für Physik 2012 wurden nun dafür geehrt, Schrödingers These widerlegt zu haben.

Im Prinzip gehorcht jeder Gegenstand – ob Atom, Sandkorn oder Kanonenkugel – den Gesetzen der Quantenphysik. Doch je größer ein Objekt ist, desto mehr Atome und Moleküle enthält es und desto schneller gehen im Zusammenspiel der vielen Teilchen deren Quanteneigenschaften verloren. Physiker bezeichnen das als Dekohärenz. Um der Quantenmechanik live zuzusehen, muss man daher in die Dimensionen einzelner Quantenteilchen

vordringen, die nicht einmal mit den besten Mikroskopen zu beobachten sind. David Wineland vom National Institute of Standards and Technology in Boulder (Colorado) und Serge Haroche von der École Normale Supérieure in Paris haben in den letzten 30 Jahren Methoden entwickelt, mit denen das scheinbar Unmögliche gelingt: einzelne Quantenteilchen zu beobachten und gleichzeitig zu steuern.

Beide Forscher verwendeten für ihre Experimente Atome und Lichtquanten (Photonen), allerdings mit jeweils unterschiedlichen Rollen. Während im Labor von Wineland die Photonen dazu dienten, über den Zustand eines einzelnen Atoms Aufschluss zu geben, benutzte Haroche umgekehrt Atome, um die Eigenschaften von Lichtteilchen zu untersuchen.

Den Grundstock für seine Forschung legte Wineland bereits in den 1970er Jahren, als er gemeinsam mit Hans Dehmelt (Physiknobelpreis 1989) eine Methode vorschlug, um Ionen mit Laserlicht zu kühlen. Ionen sind Atome, die ein oder mehrere Elektronen zu viel oder zu wenig haben. Sie tragen also eine elektrische Ladung und lassen sich deshalb mit elektrischen Feldern relativ leicht einfangen. Um sie für längere Zeit festzuhalten, muss man allerdings zunächst ihre Energie so weit verringern, dass sie den niedrigsten quantenmechanisch möglichen Energiezustand einnehmen.

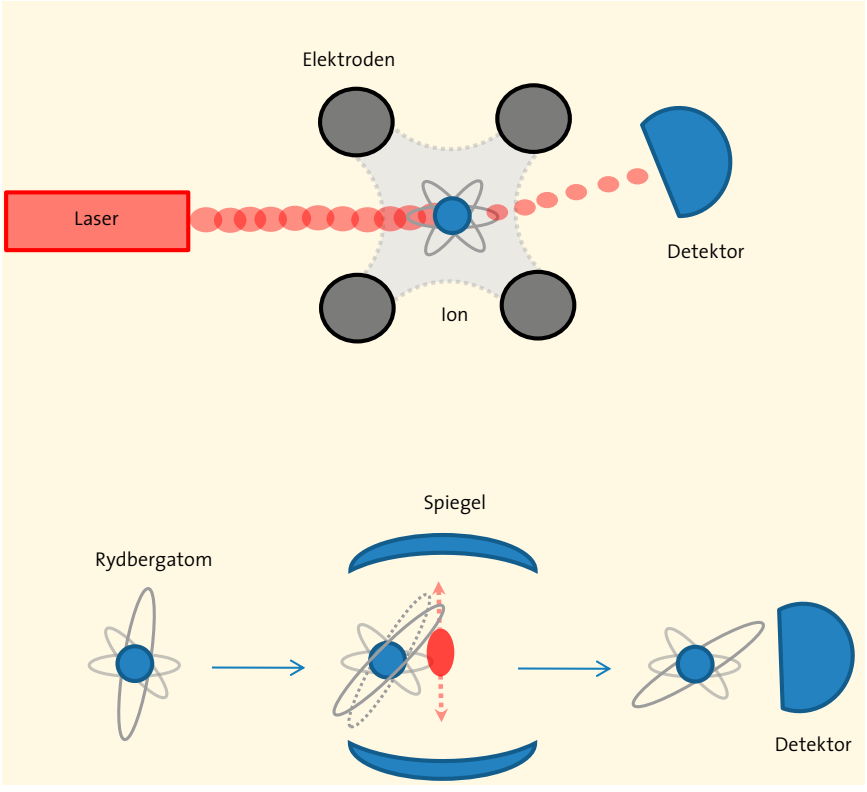
Schon einige Jahre später gelang es Wineland, einzelne Ionen für mehrere Stunden zu fixieren und zu verfolgen, wie ihre Elektronen unter dem Einfluss eines Lasers zwischen verschiedenen Energieniveaus hin und her hüpften. Die erste Beobachtung der berühmten Quantensprünge war damit geglückt.

Photonen zerstörungsfrei untersuchen

Serge Haroche wählte einen anderen Weg, um den Geheimnissen der Quantenwelt auf die Spur zu kommen: Er untersuchte Photonen, also Lichtteilchen. Deren Handhabung ist äußerst schwierig, denn normalerweise bedeutet die Beobachtung eines Photons gleichzeitig sein Ende: In einem Photodetektor etwa wird ein Lichtquant in elektrischen Strom umgewandelt, der sich mit einem Messgerät nachweisen lässt. Allerdings ist das Photon danach verschwunden. Haroche suchte nun ein behutsameres Nachweisverfahren, mit dem man ein Photon beobachten kann, ohne es zu zerstören.

Seine Methode beruht darauf, dass Atome Lichtquanten nicht nur aussenden und absorbieren, sondern mit ihnen auch auf viel subtilere Weise wechselwirken können. Vor allem so genannte Rydbergatome, deren Elektronen den Atomkern in sehr großem Abstand umkreisen, funktionieren wie extrem sensible Antennen, die auf das elektrische Feld einzelner Photonen reagieren. Anstatt das Photon zu »schlucken« und in einen anderen Energiezustand zu springen, ändert das Elektron seine Umlaufbahn nur minimal. Diese als Phase bezeichnete Änderung lässt sich messen, indem man das Atom nach der Wechselwirkung mit dem Photon einem Mikrowellenfeld aussetzt und beobachtet, ob es dabei seinen Energiezustand ändert.

Mit diesem Trick gelang es Haroche, einzelne Photonen nachzuweisen, die in einem Hohlraum zwischen zwei Spiegeln hin- und herflitzten. Da die Rydbergatome die Lichtquanten dabei nicht absorbierten, konnte die Mes-



OLIVER MORSCH

Der diesjährige Physiknobelpreis würdigt bahnbrechende Experimente mit isolierten Quantenteilchen. In David Winelands Labor wurden einzelne Ionen – elektrisch geladene Atome – mit elektrischen Feldern eingefangen. Ihr Quantenzustand ließ sich dann mit Photonen exakt messen (oben). Serge Haroche beobachtete einzelne zwischen zwei Spiegeln eingefangene Lichtteilchen, ohne sie zu zerstören. Dazu schickte er Rydbergatome durch den Hohlraum zwischen den Spiegeln und maß, wie sich die Umlaufbahnen der Elektronen geringfügig änderten (unten).

sung mehrmals hintereinander erfolgen, ohne dass das Ergebnis davon beeinflusst wurde.

Die Experimente von Wineland und Haroche haben auf eindrucksvolle Weise gezeigt, dass sich einzelne Quantenteilchen tatsächlich beobachten und zugleich kontrollieren lassen. Vieles, was noch vor wenigen Jahren nur als Gedankenexperiment möglich schien, kann jetzt im Labor direkt verwirklicht werden. Das gilt insbesondere für jene berühmte Katze, mit der Schrödinger 1935 die Paradoxien der Quantenmechanik illustrieren wollte.

Das arme Gedankentier ist gleichzeitig tot und lebendig, denn im Käfig ist ein Giftfläschchen dazu bestimmt, von einem Mechanismus zerbrochen zu werden, der seinerseits von einem radioaktiv zerfallenden Atom betätigt wird. Da der Zerfall nach quantenmechanischen Wahrscheinlichkeitsregeln erfolgt und erst feststeht, wenn man den Atomzustand beobachtet, schwebt auch die Katze zwischen Leben und Tod, bis man im Käfig nachsieht.

Anwendungsbeispiel Ionenuhr

David Wineland führte in seinen Experimenten eine ähnliche Situation herbei, indem er den Bewegungszustand eines in der Falle gefangenen Ions von seinem inneren Energiezustand – genauer: dem seiner Elektronen – abhängig machte. Physiker sprechen von quantenmechanischer Verschränkung zwischen beiden Zuständen. Bevor der eine mit Hilfe von Laserlicht gemessen wurde, blieb auch der andere – in Schrödingers Bild der Zustand der Katze – unbestimmt. Erst durch Beobachtung des inneren Atomzustands nahm auch sein äußerer Bewegungszustand eine von zwei Möglichkeiten ein.

Praktische Anwendungen der Quantenmanipulation zeichnen sich bereits ab, selbst wenn Serge Haroche in ersten Interviews nach Bekanntgabe des Nobelpreises betont hat, dass er seine Experimente primär als Grundlagenforschung versteht. Winelands gefangene Ionen etwa werden schon in extrem genauen Uhren benutzt. Im Gegensatz zu herkömmlichen Atomuhren, die auf Quantensprüngen im Mikrowellenbereich beruhen und gegenwärtig etwa zur Synchronisierung der GPS-Signale dienen, funktionieren die Ionenuhren mit sichtbarem Licht.

Dabei gehen sie 100-mal genauer. Wäre ein solcher Zeitmesser bei der Geburt des Universums vor knapp 14 Mil-

NOBELPREIS FÜR CHEMIE

Enthüllungen aus dem Reich der Sinne

Der Chemienobelpreis 2012 ging an die US-Forscher Robert Lefkowitz und Brian Kobilka. Sie entschlüsselten Struktur und Funktion des Adrenalinrezeptors, der die wichtigste Gruppe von Schaltstellen für die Kommunikation von Zellen mit ihrer Umwelt repräsentiert.

VON MICHAEL GROSS

DUKE UNIVERSITY SCHOOL OF MEDICINE

STANFORD UNIVERSITY

Robert Lefkowitz (links) ergründete die genaue Funktionsweise des Adrenalinrezeptors, und **Brian Kobilka** ermittelte die Struktur dieses für Sinneswahrnehmungen und viele andere Körperfunktionen entscheidenden Moleküls.

Adrenalin ist ein enorm wichtiger Botenstoff in unserem Körper. Das Hormon wird bei Stress ausgeschüttet und versetzt verschiedene Organe und Zelltypen in Alarmbereitschaft. Damit dieses kleine Molekül überhaupt etwas bewirken kann, muss an seinem Zielort eine molekulare Antenne existieren, die es erkennt und dann einen Schalter betätigt, der innerhalb der Zelle weitere Reaktionen in Gang setzt.

Als Robert Lefkowitz Ende der 1960er Jahre begann, diesen »Rezeptor« für Adrenalin zu suchen, konnte er die Tragweite seiner Arbeit nicht ahnen. Sie löste nicht nur das Rätsel, auf welche Weise viele Hormone ihre Wirkung ausüben, sondern enthüllte auch das Funktionsprinzip eines Großteils unserer Sinneswahrnehmungen – darunter Sehen, Riechen und Schmecken. Hätte Lefkowitz damals lediglich den Rezeptor für ein bestimmtes Hormon entdeckt, würde er dieses Jahr gewiss nicht in Stockholm geehrt werden. Sein Verdienst liegt vielmehr darin, die wichtigste Schaltstelle für die Kommunikation der Zellen mit ihrer Umwelt entdeckt und bis ins Kleinste charakterisiert zu haben. Erst im September 2011 setzte sein ehemaliger Assistent Brian Kobilka einen spektakulären Schlusspunkt hinter diese jahrzehntelangen Untersuchungen.

Schon in den 1940er Jahren hatte der amerikanische Pharmakologe Raymond

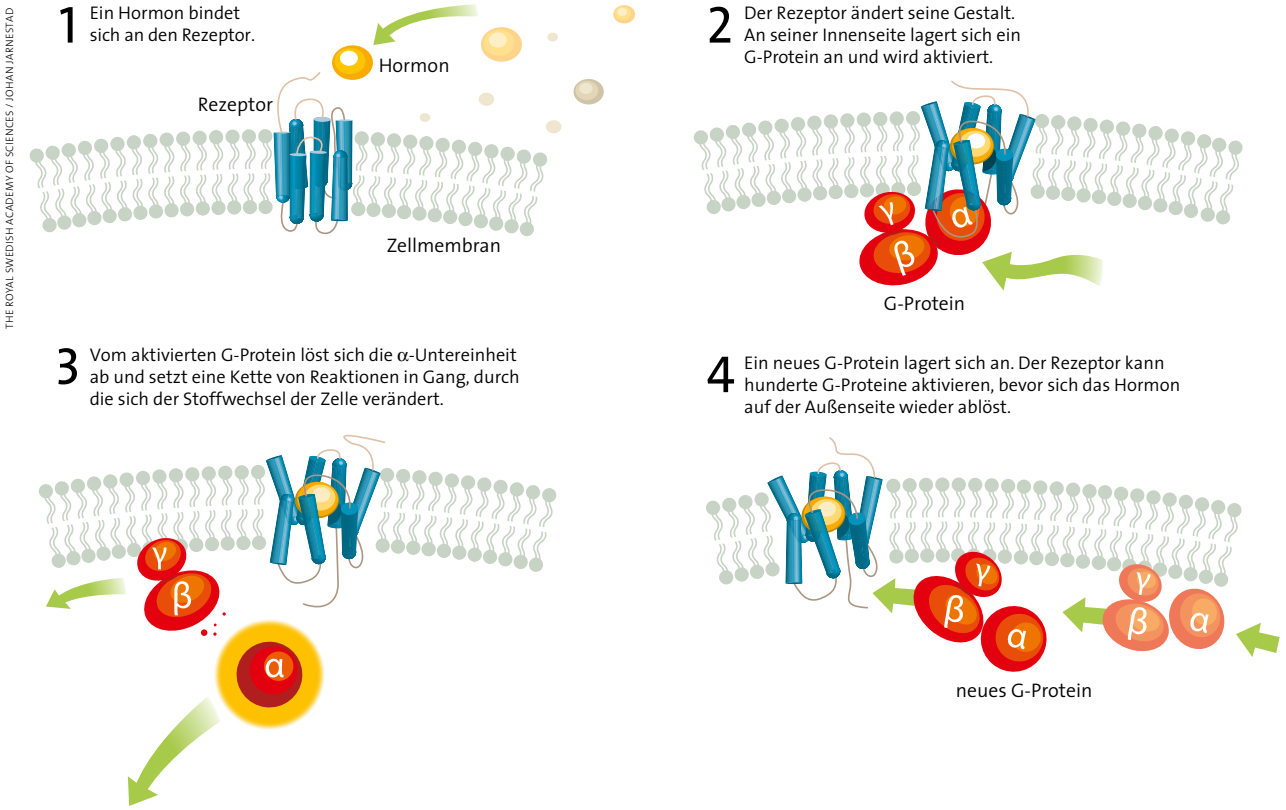
liarden Jahren in Gang gesetzt worden, so ginge er jetzt um nicht einmal fünf Sekunden falsch.

Das Nobelkomitee erwähnte noch eine mögliche Anwendung, die inzwischen die Fantasie der Forscher beflügelt: den Quantencomputer. Ein solcher Rechner beruht darauf, dass Quantensysteme in Überlagerungszuständen existieren. Bezeichnet man einen davon als 0 und den anderen als 1, so hat man damit ein Quantenbit oder »Qubit« geschaffen – also das Quantenäquivalent eines Bits, mit dem in klassischen Computern Informationen dargestellt und verarbeitet werden.

Der Clou eines Quantencomputers besteht nun darin, dass durch die Überlagerung der Zustände alle möglichen Werte eines Registers – für drei Qubits beispielsweise 2 mal 2 mal 2 = 8 Werte – gleichzeitig verarbeitet werden können. Schon in den 1990er Jahren wurden Algorithmen entwickelt, die diesen Quantenparallelismus nutzen und komplexe Berechnungen mit deutlich weniger Rechenschritten ausführen können als klassische Computer. Ein Beispiel dafür ist die Primfaktorzerlegung von großen Zahlen; mit einem Quantenalgorithmus des amerikanischen Informatikers Peter Shor sollte sie ungleich schneller gelingen als mit herkömmlichen Verfahren.

Zwar gibt es bis heute noch kein praktisch einsetzbares Gerät dieser Art, doch die Ergebnisse der diesjährigen Nobelpreisträger zeigen, dass so etwas im Prinzip machbar wäre. David Wineland und seine Kollegen haben mit gefangenen Ionen bereits rudimentäre Quantenrechner gebaut, die Shors Algorithmus für die Primfaktorzerlegung mit kleinen Zahlen erfolgreich ausführen können (siehe seinen Beitrag in Spektrum der Wissenschaft 6/2009, S. 34). Auch mit anderen physikalischen Systemen, etwa mit Halbleiterelementen oder mit Fremdatomen in Diamanten, versuchen Forscher weltweit, Quantencomputer zu konstruieren. Ob ihnen das letztendlich gelingen wird oder nicht – Wineland und Haroche haben mit ihrer Forschung die Tür zu einer Welt aufgestoßen, in der viel mehr möglich ist, als die Väter der Quantenmechanik zu träumen wagten.

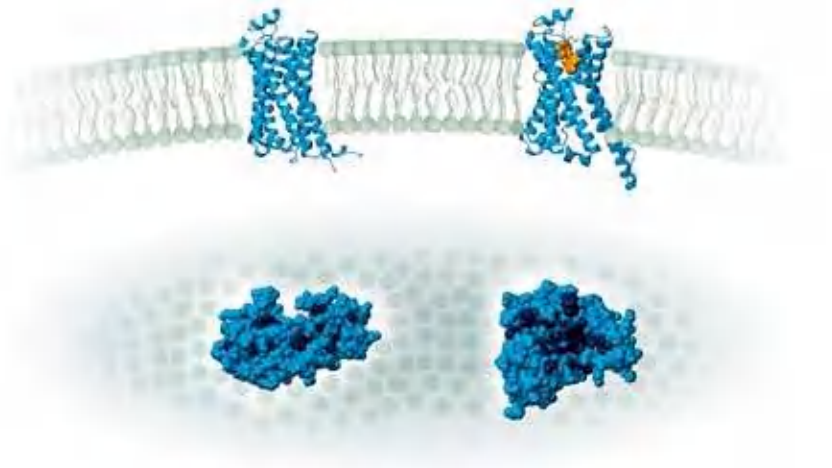
Oliver Morsch ist promovierter Physiker und forscht an der Universität Pisa und dem Istituto Nazionale di Ottica über ultrakalte Atome und Quantenkontrolle.



THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES / JOHAN JARNESTAD

P. Ahlquist (1914–1983) herausgefunden, dass Adrenalin auf verschiedene Gewebe unterschiedliche Wirkungen ausübt, die sich grob in zwei Gruppen einteilen ließen. Folglich müsse es, so seine Hypothese, zwei Arten von Rezeptoren geben. Er nannte sie α- und β-adrenerge Rezeptoren, ohne freilich die geringste Vorstellung über ihre Beschaffenheit oder Funktionsweise zu haben. Manche bezweifelten sogar, dass sie überhaupt existierten.

Wenn sich ein Hormon, Geschmacks- oder Duftstoff an einen G-Protein-gekoppelten Rezeptor auf der Zelloberfläche anlagert, löst er die hier gezeigte Reaktion innerhalb der Zelle aus.



THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES / JOHAN JARNESTAD

Wie die Strukturanalysen der Arbeitsgruppe von Brian Kobilka zeigten, öffnet sich der die Zellmembran durchspannende β-adrenerge Rezeptor (blau) wie ein Blumenstrauß, wenn sich ein Hormon (orange) an seiner Außenseite anlagert. In der Aufsicht (unten) wird deutlich, dass sich dabei im Innern des Moleküls ein hydrophober (Wasser meidender) Spalt (dunkelblau) öffnet, der die gleichfalls hydrophobe α-Untereinheit des G-Proteins aufnehmen kann.

Der erste Durchbruch, den Lefkowitz und andere erzielten, war 1974 die Entwicklung von radioaktiv markierten Substanzen, die sich spezifisch an den β-adrenergen Rezeptor (oder auch: β-Adrenozeptor) binden. Das ermöglichte es, ihn zu isolieren und zu ergründen, wie er seine Aufgabe erfüllte. Bis 1980 erarbeiteten Lefkowitz und seine Mitarbeiter in groben Zügen das heute noch gültige Funktionsmodell.

Demnach erstreckt sich der Rezeptor quer durch die Zellmembran und ändert seine Gestalt, wenn das Hormon an der Außenseite andockt. Dadurch lagern sich auf der Innenseite so genannte G-Proteine an, deren zentrale Rolle Martin Rodbell (1925–1998) und Alfred G. Gilman von der University of Texas in Dallas ebenfalls in den 1970er Jahren entdeckten, wofür sie 1994 den Medizinnobelpreis erhielten (siehe Spektrum der Wissenschaft 9/1992, S. 54, und 12/1994, S. 16). Die entscheidende Funktionseinheit für den Empfang von molekularen Signalen ist also der Dreierkomplex aus Botenstoff, Rezeptor und G-Protein. Deshalb spricht man auch von einem G-Protein-gekoppelten Rezeptor (in der englischen Fachliteratur als GPCR abgekürzt).

Kobilka kam Mitte der 1980er Jahre als Postdoktorand in Lefkowitzs Labor an der Duke University in Durham (North Carolina). Sein Ziel war es, den β-adrenergen Rezeptor mit genetischen Methoden weiter zu charakterisieren. Als er die Sequenz des zugehörigen Gens vollständig ermittelt hatte, zeigte sich eine verblüffende Ähnlichkeit mit einem bereits lange vorher bekannten Signalprotein, das eine völlig andere Aufgabe erfüllt: dem als Lichtsensor in der Netzhaut dienenden Rhodopsin.

Gemeinsame Basis für Sehen, Riechen und Schmecken

Auch alle weiteren Struktur- und Funktionsuntersuchungen bestätigten die enge Verwandtschaft der beiden Moleküle. Der wesentliche Unterschied liegt darin, dass Rhodopsin seinen molekularen Botenstoff, das Retinal, von vornherein in gebundener, aber inaktiver Form enthält. Für die Aktivierung sorgen einfallende Lichtquanten, indem sie die Struktur des Retinals verändern. Von da ab geht die Signalkette genauso weiter wie beim Adrenalin: Das aktivierte Botenmolekül verändert die Gestalt des Rezeptors, so dass dieser an der Innenseite ein G-Protein bindet, das hier Transducin heißt, und so die Botschaft weiterleitet. Rhodopsin ist also ebenfalls ein GPCR.

Dasselbe gilt für fast alle anderen Membranrezeptoren, mit denen wir irgendetwas fühlen, riechen oder schmecken, wie sich in den letzten Jahrzehnten erwies. Allein im menschlichen Genom ließen sich mehr als 800 davon nachweisen. Ein prominentes Beispiel sind die Geruchsrezeptoren, für deren Untersuchung Linda B. Buck von der University of Washington in Seattle und Richard Axel von der Columbia University in New York 2004 den Medizinnobelpreis erhielten. Tierarten mit besserem Geruchssinn als wir Menschen haben meist auch mehr GPCR-Gene.

Die Rezeptoren für die Geschmacksnoten bitter, süß und umami, welche die Arbeitsgruppen von Charles S. Zuker von der Columbia University und Nicholas Ryba vom National Institute of Dental and Craniofacial Research in Bethesda (Maryland) zwischen 2000 und 2003 entdeckten, sind gleichfalls mit G-Proteinen gekoppelt. Nur das Geschmacksempfinden für sauer und salzig funktioniert anders.

Diese Erkenntnisse, die auf der Arbeit der diesjährigen Chemienobelpreisträger beruhen, sind von enormer medizinischer Bedeutung. So wirken etwa die Hälfte aller Arzneimittel auf G-Protein-gekoppelte Rezeptoren, darunter Betablocker, Antihistaminika und verschiedene Psychopharmaka.

In den letzten Jahren widmete sich Kobilka, der inzwischen an der Stanford University (Kalifornien) arbeitet, der räumlichen Gestalt des Rezeptors und ihrer Änderung beim Andocken von Adrenalin. Es gab ein Wettrennen um die Aufklärung der detaillierten dreidimensionalen Struktur des Dreierkomplexes, also der biologisch aktiven Form eines G-Protein-gekoppelten Rezeptors.

Anfang 2011 berichteten sowohl Kobilka als auch die Arbeitsgruppe von Christopher Tate vom Laboratory of Molecular Biology in Cambridge (England) über einen ersten Teilerfolg. Es war ihnen gelungen, alle drei Komponenten zusammen zu kristallisieren, wodurch sich per Röntgenbeugung die exakte Molekülstruktur dieses Verbunds ermitteln ließ. Der Rezeptor lag darin aber leider nur in der bereits bekannten inaktiven Form vor, in die er nach der Signalübergabe an das G-Protein zurückkehrt.

Mit einem Trick konnte ihn Kobilkas Team wenig später erstmals auch in aktiviertem Zustand röntgenographisch abbilden *(Nature 469, S. 175, 2011)*. Dazu ersetzten die Forscher das G-Protein durch einen Miniatur-Antikörper, der sich von den so genannten Schwere-Ketten-Antikörpern der Kamele ableitet (siehe Spektrum der Wissenschaft 11/2000, S. 24). Dieser lagerte sich ebenfalls an den aktivierten Rezeptor an, verhinderte aber dessen Rückkehr in den inaktiven Zustand, weil er das Signal nicht übernehmen konnte.

Die Struktur des Komplexes mit einem Original-G-Protein und dem Rezeptor in aktiver Form konnte Kobilkas Arbeitsgruppe schließlich im September 2011 präsentieren. Auch hier waren wieder einige Kunstgriffe erforderlich. Diesmal hinderten die Forscher – erneut mit Hilfe eines Miniatur-Antikörpers – das G-Protein daran, das Signal anzunehmen. Außerdem verknüpften sie das Adrenalin fest mit dem Rezeptor und verringerten dessen Beweglichkeit, indem sie ein komplettes fremdes Protein in eine der Schlaufen einfügten, welche die sieben quer durch die Zellmembran verlaufende Abschnitte verbinden *(Nature 477, S. 549, 2011)*.

Trotz all dieser Manipulationen enthielt der Komplex die drei wesentlichen Bausteine dieser enorm wichtigen Relaisstation in ihrem natürlichen Zustand. Damit brachte Kobilka die Suche, die Lefkowitz mehr als 40 Jahre vorher begonnen hatte, zum krönenden Abschluss.

Michael Groß ist promovierter Biochemiker und Wissenschaftsjournalist in Oxford (England).

NOBELPREIS FÜR WIRTSCHAFTSWISSENSCHAFT

Junge Ärzte und Eheglück

Lloyd S. Shapley und Alvin E. Roth erhalten den diesjährigen Wirtschaftsnobelpreis für ihre Arbeiten zur kooperativen Spieltheorie.

VON CHRISTOPH PÖPPE

ARCHIV DER FAMILIE SHAPLEY

STANFORD UNIVERSITY NEWS SERVICE / LINDA A. CICERO

Lloyd Shapley (links) wurde erst 1981 Professor an der University of California in Los Angeles, die den 89-Jährigen bis heute zu ihren Mitgliedern zählt. **Alvin E. Roth** ist zugleich Professor in Harvard und in Stanford.

Die beiden Preisträger haben auf ihrem Arbeitsgebiet eine so strikte Arbeitsteilung – hier der Theoretiker, da der Praktiker – praktiziert, dass sie nie ernsthaft zusammengearbeitet haben. Lloyd S. Shapley, Jahrgang 1923, verfasste Anfang der 1960er Jahre als Angehöriger der amerikanischen Denkfabrik RAND Corporation bahnbrechende theoretische Arbeiten zum Geschehen auf Märkten, die nicht durch Preise gesteuert werden. Zwei Jahrzehnte später erforschte der eine Generation jüngere Alvin E. Roth (geboren 1951) einen solchen nicht preisgesteuerten Markt, nämlich den Arbeitsmarkt für amerikanische Mediziner nach dem Universitätsabschluss – und fand, dass sich mit Shapleys Theorie ein spezielles Vermittlungsverfahren nicht nur erklären, sondern sogar verbessern ließ. In der Folge konnte Roth Shapleys theoretische Erkenntnisse auf eine Vielzahl praktischer Probleme anwenden.

Das theoretische Fundament für Shapleys Werk ist die – weit gehend von ihm selbst geschaffene – kooperative Spieltheorie. Die geläufigere nichtkooperative Spieltheorie handelt typischerweise von Akteuren mit gegensätzlichen Interessen, die vor allem keine Chance haben, verlässliche Vereinbarungen miteinander abzuschließen. Paradebeispiel ist das viel diskutierte Gefangenendilemma. In der kooperativen Spieltheorie dagegen sind die Akteure zu bindenden Verabredungen fähig und profitieren in der Regel von einer Zusammenarbeit. Gleichwohl will jeder von ihnen, wie in der Wirtschaftswissenschaft üblich, seinen persönlichen Nutzen maximieren. Das schafft ausreichend Raum für Konflikte und damit ein Betätigungsfeld für die Wissenschaftler.

Das mathematische Modell für solche Situationen umfasst Akteure – Einzelpersonen oder Firmen –, die entweder einzeln oder in Zusammenschlüssen (»Koalitionen«) ihr Geld verdienen können. Dabei sind die Einkünfte, die jede Koalition erzielen könnte, im Modell vorgegeben. Typischerweise sind sie größer als die Summe der Einkünfte ihrer Mitglieder; das sind die Vorteile des arbeitsteiligen Wirtschaftens.

Wie teilen die Mitglieder den so erzielten Überschuss unter sich auf? Damit die Koalition überhaupt zusammenbleibt, muss jeder von ihnen min-

destens so viel vom gemeinsamen Kuchen abkriegen, wie er allein erwirtschaften könnte; sonst hätte er einen Anreiz, auszuscheiden und sein eigenes Ding zu machen oder sich einer anderen Koalition anzuschließen, wo für ihn mehr zu holen ist. Dasselbe Argument gilt für jede Teilmenge der Koalition.

Man nennt eine Aufteilung der erwirtschafteten Gesamtsumme stabil, wenn sie keinem Akteur und keiner Teilgruppe von Akteuren einen derartigen Anreiz zum Aussteigen bietet, und eine Koalition stabil, wenn es für sie eine stabile Aufteilung der Einkünfte gibt. Nach dem Ende der Koalitionsverhandlungen haben sich typischerweise alle Akteure zu stabilen Koalitionen zusammengefunden. Dieser Gleichgewichtszustand hat zwei wesentliche Eigenschaften mit dem Nash-Gleichgewicht in der nichtkooperativen Spieltheorie gemeinsam: Er ist nicht unbedingt optimal, aber es bewegt sich nichts, weil mindestens ein Beteiligter von einer Veränderung einen Nachteil hätte; und er ist nicht eindeutig bestimmt.

Immerhin: Für die Aufteilung der Einkünfte innerhalb einer Koalition hat Shapley eine Vorschrift gefunden, die allgemein als gerecht empfunden wird. Jeder Beteiligte bekommt einen geeignet definierten Mittelwert aus den Anteilen, die er als Mitglied jeder denkbaren Teilkoalition erwirtschaften würde. Dieser Wert, der »Shapley-Wert«, findet häufig Verwendung, wenn es um gerechte Aufteilungen geht.

Derselbe Formalismus ist auf Koalitionen anwendbar, die stets aus zwei Mitgliedern verschiedener Art zusammengesetzt sind. Das lässt sich am besten mit Männern und Frauen illustrieren, weswegen das zugehörige Problem unter dem Stichwort »stable marriage« (stabile Ehe) in die Literatur eingegangen ist. Ein Arrangement von Ehen zwischen n Männern und n Frauen ist stabil, wenn kein Mann und keine Frau sich zueinander mehr hingezogen fühlen als zu ihrem jeweiligen Ehegatten.

Im Gegensatz zu den Einkünften aus einer gewöhnlichen Koalition wird der Wert einer glücklichen Ehe in diesem Modell nicht quantifiziert. Vielmehr führen alle Beteiligten Präferenzlisten, auf denen die denkbaren Partner in der Reihenfolge ihrer Begehrtheit notiert sind. Mit dieser Information findet ein Algorithmus, den Shapley 1962 gemeinsam mit seinem Fachkollegen David Gale (1921–2008) fand, stets ein stabiles Arrangement (siehe die »Mathematischen Unterhaltungen« ab S. 82).

Ein gemeinsamer Formalismus für Ehen und Arbeitsplätze

Weniger romantisch, aber im Prinzip gleichartig ist die oben angesprochene Aufgabe, die Wünsche der Jungärzte und die der einstellenden Krankenhäuser in Einklang zu bringen. Beide Seiten haben ihre Präferenzlisten. Man kann nicht erwarten, dass jedes Krankenhaus den Kandidaten seiner ersten Wahl und jeder frischgebackene Arzt den Arbeitsplatz seiner Träume bekommt, aber es sollte nicht passieren, dass Herr *X* lieber in die Pädiatrie gegangen wäre als in die Urologie, wo er eingestellt wurde, und zugleich die Pädiatrie lieber Herrn *X* gehabt hätte als Herrn *Y*, der jetzt die Stelle hat. Das ist die Stabilitätsbedingung.

Als in den 1940er Jahren die Medizinabsolventen knapp wurden, gingen die Krankenhäuser dazu über, den potenziellen Kandidaten bindende Verträge zu einem so frühen Zeitpunkt anzubieten, dass noch keine der Parteien eine brauchbare Präferenzliste haben konnte. Fehlzuweisungen waren wegen zu knapper Zeit nicht mehr korrigierbar. Als Reaktion darauf wurde eine zentrale Vermittlungsstelle, das National Resident Matching Program (NRMP), geschaffen. Beide Seiten reichten dort ihre Präferenzlisten ein und bekamen Zuweisungen zurück, mit denen sie gut leben konnten.

Alvin E. Roth zeigte 1984, dass das NRMP erfolgreich war und allgemein akzeptiert wurde, weil es im Wesentlichen den Algorithmus von Gale und Shapley praktizierte. Es gab sogar Gegenbeispiele: In Großbritannien wird dasselbe Problem durch regionale Vermittlungsstellen gelöst, und die Verfahren, die nicht der Shapley-Theorie entsprachen, wurden nach einer Weile aufgegeben und durch bessere ersetzt.

Anwendungen des Verfahrens auf andere Gebiete erforderten Erweiterungen der Theorie. So musste Roth das Verfahren für die Zuweisung von Schülern in Boston an weiterführende Schulen so modifizieren, dass die Schüler keinen Anreiz mehr hatten, ihre Präferenzen falsch zu deklarieren. In jüngerer Zeit bewarben sich zunehmend Jungmedizinerpaare am NRMP vorbei auf Stellen, weil beide in dieselbe Stadt kommen wollten – eine Präferenz, die nicht in den Formalismus des Gale-Shapley-Verfahrens passte. Aber auch an derlei Wünsche ließ sich der Algorithmus anpassen.

Neuere Forschungen Roths befassen sich mit einem sehr heiklen Thema: der Zuweisung von Nieren lebender Spender an Transplantationsbedürftige. Herr *A* ist bereit, seiner todkranken Frau eine Niere zu spenden, desgleichen Frau *B* ihrem Mann; aber immunologisch passen Spender und Empfänger nicht zusammen. Herrn *A*s Niere würde jedoch Herrn *B* gut bekommen und Frau *B*s Niere Frau *A*, so dass sich ein Tausch anbietet. Solche Gelegenheiten sind selten, könnten aber häufiger werden, wenn größere Anzahlen von Spender-Empfänger-Paaren und längere Tauschketten in das Verfahren einbezogen würden.

An dieser Stelle stellt Roth vorsichtig, aber deutlich das Prinzip in Frage, das bislang alle derartigen Zuteilungsmärkte beherrscht: Es darf kein Geld fließen. Eine Braut soll ebenso wenig käuflich sein wie ein Platz an einer renommierten Schule oder eine Spenderniere. Aber die Theorie und die bisherige Erfahrung lassen darauf schließen, dass es weit mehr Lebendtransplantationen – unbestritten die Therapie der Wahl für gewisse häufige Formen von Nierenversagen – geben könnte, wenn man den Spender für seine Niere bezahlte. Wie die Zahl an so geretteten Leben gegen die naheliegenden und vehement vorgetragenen ethischen Bedenken aufzuwiegen ist, bleibt eine Frage für die Zukunft.

Christoph Pöppe ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Schuldig oder krank?

Vor Gericht sind Geist und Gehirn nicht das Gleiche.

Nach der Beweisaufnahme im Prozess gegen einen Serientäter hält der Staatsanwalt sein Schlussplädoyer. Darin legt er dar, warum in diesem Fall unbedingt eine drakonische Strafe zu verhängen ist. »Vor Ihnen steht ein unverbesserlicher Gewalttäter«, ruft er und zeigt theatralisch auf den Angeklagten. »Das folgt zweifelsfrei aus dem hier vorliegenden psychiatrischen Gutachten eines Sachverständigen, wonach der Angeklagte zu sozial angepasstem Verhalten von vornherein unfähig ist. Als typischer Psychopath wird er immer wieder alle Hemmungen verlieren und eine Gefahr für seine Mitmenschen sein. Darum fordere ich die für solche Verbrecher vorgesehene Höchststrafe.«

Dann ist der Verteidiger am Zug. »Hohes Gericht«, beginnt er, »der Angeklagte ist keineswegs der kaltblütige Psychopath, als den ihn mein werter Vorredner darstellt, sondern selbst ein wehrloses Opfer – jawohl, Sie haben ganz richtig gehört! Vor Ihnen steht das typische Opfer eines genetischen Defekts. Dieser verursacht, wie aus dem von mir vorgelegten neurobiologischen Gutachten ganz eindeutig hervorgeht, eine hirnorganische Störung, die den Angeklagten unweigerlich zu sozial unangepasstem Verhalten zwingt. Ich fordere das Gericht daher auf, meinen Mandanten freizusprechen oder seine biologische Erblast zumindest als mildernden Umstand zu werten.«

Das Szenario ist überspitzt, aber in der Tat scheinen neurobiologische, also genetisch und hirnanatomisch begründete Defekte eher strafmildernd zu wirken, während psychiatrisch diagnostizierte Asozialität das Strafmaß sogar hochtreiben kann. Diesen paradoxen Sachverhalt legt – zumindest für die USA – eine originelle Studie nahe, die ein Philosoph, eine Psychologin und eine Juristin an der University of Utah in Salt Lake City durchgeführt haben *(Science 337, S. 846, 2012)*.

Die Forscher um den Philosophen James Tabery konfrontierten knapp 200 amerikanische Richter mit dem fiktiven Fall eines wiederholt rückfälligen Gewalttäters, der jemanden grundlos schwer verletzt haben sollte und laut psychiatrischem Gutachten an einer irreparablen psychischen Störung litt. Welches Strafmaß schien hier angebracht? Bei der Hälfte der Juroren fügten die Forscher zusätzlich ein neurobiologisches Gutachten bei, das dem Täter einen genetisch bedingten Hirnschaden bescheinigte.

Alle Richter hielten angesichts der Schwere der Tat und der schlechten Rehabilitationsprognose eine hohe Strafe für angebracht – doch bei denen, die außer dem psychiatrischen auch das neurologische Gutachten vorliegen hatten, fiel sie im Schnitt geringer aus: 13 statt 14 Jahre.

Warum wirkt ein genetisch-hirnorganischer Defekt strafmildernd, ein psychischer aber nicht? Kann der Straffällige weniger für ein »physisches« Handikap als für ein »psychisches«?

Ich vermute, viele Juristen sind intuitiv – ohne sich selbst darüber Rechenschaft abzulegen – Anhänger des psychophysischen Dualismus. Für sie wohnt unser Geist in einem separaten Körper, den er auf ganz ähnliche Weise im Rahmen der Gesetze durchs Leben zu steuern hat wie ein Autofahrer sein Gefährt durch den Straßenverkehr. Wenn der regelwidrige Umgang mit dem Wagen zu einem Unfall führt, ist selbstverständlich eine Sanktion fällig; stellt ein Gutachter jedoch einen technischen Mangel fest, beispielsweise defekte Bremsen, darf der Fahrer darauf hoffen, mit einer geringeren oder sogar ganz ohne Strafe davonzukommen.

Michael Springer

Natur
Energie
Plus

Mit der Natur auf einer Welle.

In den letzten zwölf Monaten haben sich über 30.000 Bürger für Strom aus 100 % Wasserkraft von NaturEnergiePlus entschieden. Wann wechseln Sie zum Strom aus sauberer Quelle?

→ Jetzt wechseln!

www.naturenergieplus.de

NEUE VIERTEILIGE SERIE

Allergien – Geißel des 21. Jahrhunderts

Allergien nehmen dramatisch zu. 30 bis 40 Prozent der Weltbevölkerung sind laut dem jüngsten Weißbuch der World Allergy Organization inzwischen davon betroffen. Während es bei Seuchen wie Aids und Malaria oder Volkskrankheiten wie Diabetes klare Vorstellungen darüber gibt, wie sich ihnen begegnen lässt, liegt bei Allergien noch vieles im Dunkeln. Niemand weiß letztlich genau, was ihre tiefere Ursache ist und wie die optimalen Maßnahmen zur Prävention und Therapie aussehen. Und ebenso weiß niemand, warum ausgerechnet eine Verbesserung des Lebensstandards und der hygienischen Bedingungen das Auftreten von Asthma, Ekzemen und Heuschnupfen sowie anderen Überempfindlichkeitsreaktionen gegenüber Umweltreizen fördert.

Dabei schien das Problem schon vor vier Jahrzehnten auf dem besten Weg zu einer Lösung. Damals erkannten Forscher die Schlüsselrolle einer bestimmten Sorte von Antiköpermolekülen, den Immunglobulinen vom Typ E. Die haben eigentlich die Aufgabe, Parasiten zu bekämpfen. Bei Allergikern richten sie sich jedoch gegen allgegenwärtige Stoffe aus der Umwelt.

Der Grund dafür ist bis heute unklar. Immerhin haben neue Forschungen eine Fülle weiterer Faktoren aufgedeckt, die an der Entstehung von Allergien beteiligt sind, und damit auch Ansatzpunkte für Vorbeugungsmaßnahmen und Therapien geliefert. Die vorliegende Serie nähert sich dem Thema von allen Seiten und gibt mit Artikeln aus »Nature« und »Nature Medicine« einen umfassenden Überblick über den aktuellen Wissensstand, angefangen von der Grundlagenforschung bis hin zu den neuesten Erkenntnissen darüber, wie sich das Leiden verhüten oder lindern lässt.

DIE NEUE SERIE IM ÜBERBLICK

ALLERGIEN –
GEISSEL DES 21. JAHRHUNDERTS

Teil 1	**▸ Eine Allergikerkarriere**	**Dezember 2012**
	▸ Allergien auf dem Vormarsch	
	▸ Wenn im Essen der Tod lauert	
	▸ Was tun gegen Neurodermitis?	
Teil 2	▸ Welche Rolle spielt die Veranlagung?	Januar 2013
	▸ Die Bedeutung der Darmflora	
	▸ Ist zu viel Hygiene schädlich?	
Teil 3	▸ Die Haut als Eintrittspforte	Februar 2013
	▸ Asthma – unerwartet komplex	
	▸ Ansätze zur vorbeugenden Behandlung	
Teil 4	▸ Der Sinn allergischer Reaktionen	März 2013
	▸ Wohin geht die Forschung?	

FOTOLIA / SEBASTIAN KAULITZKI

DER ATOPISCHE MARSCH

Eine Allergikerkarriere

Allergien kommen selten allein. Neue Forschungsergebnisse könnten erklären, weshalb viele Kinder mit allergischen Ekzemen später auch noch Asthma, Heuschnupfen und Nahrungsmittelunverträglichkeiten entwickeln.

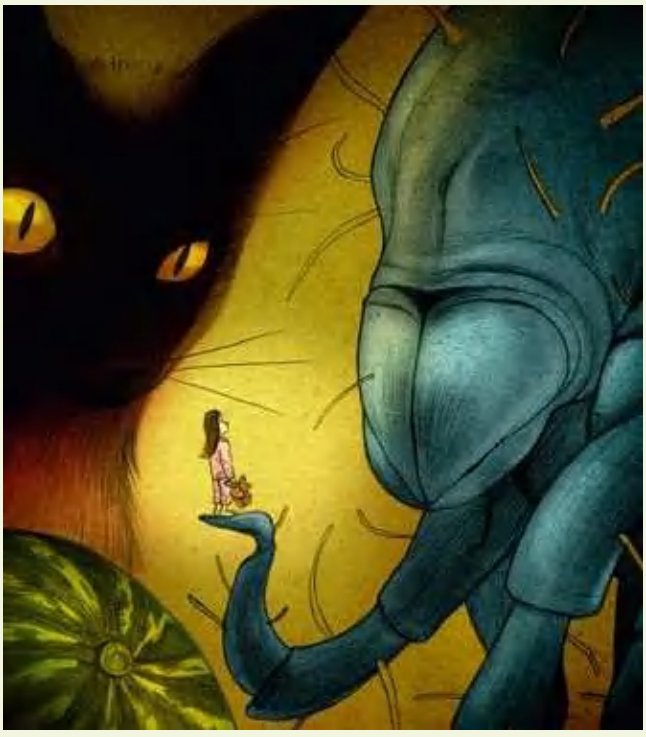
Von Paige Brown

Meinen ersten schweren Asthmaanfall hatte ich als kleines Kind, als ich im Gästebett meiner Freundin übernachtete – zusammen mit ihrem Kätzchen. Ich war viel zu schüchtern, um mich über die Haare auf meinem Kissen zu beklagen. Stattdessen bemühte ich mich, flach zu atmen, um möglichst wenig von den feinen Partikeln in die Lunge zu bekommen, welche die Katze in der Zimmerluft und auf dem Bettzeug hinterlassen hatte. Erst gegen drei Uhr morgens – mein Gesicht war geschwollen und die Luftröhre so entzündet, dass ich kaum noch atmen konnte – brachte ich den Mut auf, die Eltern meiner Freundin zu wecken. Die Nacht endete in der Notaufnahme des Krankenhauses: Die Ärzte ließen mich ein bronchienerweiterndes Mittel inhalieren und verabreichten mir eine ordentliche Dosis Antihistaminika.

Der Vorfall war nur eine Episode in meinem lebenslangen Kampf mit allergischen Erkrankungen und einer schweren Überempfindlichkeit gegenüber Umweltreizen. Meine Mutter, die selbst zu Allergien neigt, erinnert sich gut an die entzündeten, juckenden Hautstellen, die mich schon in der frühen Kindheit quälten. Es waren die typischen Symptome des atopischen Ekzems, besser bekannt unter der alten Bezeichnung Neurodermitis (siehe den Beitrag ab S. 42). Damals zeigte ich auch, wie mein Vater erzählt, »eine eigenartige Reaktion«, sobald Tiere in der Nähe waren: Ich kratzte mich am Hals, meine Augen röteten sich und tränten, die Lider schwollen an. Diese typischen Symptome der allergischen Rhinitis, gemeinhin als Heuschnupfen bezeichnet, sind die Reaktion des menschlichen Immunsystems auf allergieauslösende Proteine, die beispielsweise in Haaren oder Hautschuppen von Tieren vorkommen.

Ein anfälliges Kind wird in den ersten Lebensjahren wahrscheinlich gegenüber einer Reihe solcher Allergene sensibilisiert, wenn sein eigenes Immunsystem reift und allmählich Abwehrreaktionen gegen Fremdsubstanzen entwickelt. In den Körper gelangen die Allergieauslöser entweder über die Schleimhäute der Atemwege oder über die Haut, sofern deren natürliche Barrierefunktion beeinträchtigt ist. Anfangs sind die Reaktionen meist örtlich begrenzt. Mit der Zeit können sie aber auch systemischen Charakter annehmen, das heißt den gesamten Körper erfassen. Ich selbst wurde vermutlich zunächst über die Haut gegen Kontaktallergene sensibilisiert, was später dazu führte, dass auch meine Lungen übermäßig auf eingeatmete Fremdstoffe reagierten.

Zur Sensibilisierung kommt es, wenn T-Helferzellen vom Typ 2 (Th2), die zu den weißen Blutkörperchen (Leukozyten) gehören, ein Allergen erkennen und daraufhin bestimmte Signalstoffe freisetzen. Diese so genannten Zytokine veranlassen dann B-Lymphozyten, einen weiteren Typ von weißen Blutkörperchen, bei Kontakt mit dem Allergen eine spezielle Sorte von Antikörpern gegen den Fremdstoff zu produzieren und auszuscheiden: Immunglobuline der Klasse E (IgE). Sie heften sich an die Oberfläche von wieder anderen Bestandteilen des Immunsystems: basophilen Granulozyten, die im



JONATHAN BURTON

Ein allergiegefährdetes Kind kann durch viele Bestandteile seiner Umwelt sensibilisiert werden – von Katzenhaaren über Hausstaubmilben bis hin zu Wassermelonen.

AUF EINEN BLICK

BINDEGLIED ZWISCHEN ALLERGIEN

1 Allergien entwickeln sich oft in einer typischen Reihenfolge, die als **atopischer Marsch** bezeichnet wird.

2 Als Bindeglied zwischen den verschiedenen Allergiearten hat sich der **Botenstoff thymisches stromales Lymphopoietin (TSLP)** herausgestellt.

3 TSLP sorgt für die Vermehrung, Mobilisierung und Aktivierung von **Immunzellen** im gesamten Körper. Damit bietet es sich als Ansatzpunkt für neue Medikamente gegen Allergien an.

Blut zirkulieren, sowie den mit ihnen verwandten Mastzellen, die sich vorwiegend in den Schleimhäuten des Bindegewebes aufhalten.

Damit ist die Sensibilisierungsphase abgeschlossen. Wenn das Allergen nun das nächste Mal auf Bindegewebe trifft, wird es von den IgE-Antikörpern auf der Oberfläche der basophilen Granulozyten und Mastzellen gebunden. Diese schütten daraufhin das in den Granula (Bläschen) enthaltene Histamin aus, das innerhalb von Sekunden bis wenigen Minuten eine heftige Entzündungsreaktion auslöst. Dabei strömt vermehrt Blut an die betreffende Stelle, so dass sie sich rötet und anschwillt.

Ab der Pubertät plagte mich vor allem das allergische Asthma. Vielleicht noch frustrierender und belastender war jedoch, dass auch Allergien gegen viele Nahrungsmittel hinzukamen. Zudem litt ich weiter an chronischer Neurodermitis, die vielerlei Beschwerden, Schlafmangel durch den ständigen Juckreiz und Hautveränderungen verursachte. »Notieren Sie in der Krankenakte: Patientin zeigt charakteristische Symptome einer Atopie«, sagte meine Hautärztin Mary Dobson zu ihrer Helferin, als ich sie in ihrer Praxis in Baton Rouge (Louisiana) bei einem besonders schweren Schub aufsuchte.

Unter Atopie versteht man eine Überempfindlichkeit gegenüber Umweltallergenen von Pollen, Tieren und bestimmten Lebensmitteln, die auf einer genetischen Veranlagung zu besonders starken IgE-vermittelten Immunreaktionen beruht. Thomas Platts-Mills, Leiter der Abteilung für Asthma und allergische Erkrankungen an der University of Virginia in Charlottesville, beschreibt den Atopiker als Person, die sensibler als andere Menschen geringe Mengen von Fremdproteinen erkennt und darauf anspricht. »Allergien sind der Preis für unser hocheffektives Immunsystem, das uns vor den großen Seuchen der Vergangenheit geschützt hat«, erläutert er.

Manchmal komme ich mir vor wie die wandelnde Illustration des »atopischen Marsches«. Dieser Begriff umschreibt die Karriere eines Allergikers, dessen Krankheitsbild sich von der Kindheit bis ins Erwachsenenalter in charakteristischer Weise verändert und ausweitet. Dabei spielen viele Faktoren zusammen. Einige sind angeboren: Varianten oder Mutationen von Genen, die wichtige Funktionen des Immunsystems steuern oder die Eigenschaften der Haut beeinflussen. Andere beruhen auf Einwirkungen von außen: Kontakt mit Allergenen, Infektionen in frühen Lebensphasen, Umweltverschmutzung und chemische Reizstoffe, welche die Barrierefunktion der Haut beeinträchtigen und dadurch eine Sensibilisierung gegenüber Fremdstoffen begünstigen.

Heute sind bis zu 20 Prozent der Menschen in den Industrieländern Atopiker. Wer eine Allergie hat, bekommt mit höherer Wahrscheinlichkeit auch eine zweite oder dritte. Viele Betroffene leiden an der »atopischen Trias« aus Neurodermitis, Heuschnupfen und Asthma. Das belegt etwa eine Studie, die Forscher um Donald Leung von der Abteilung für pädiatrische Allergologie und Immunologie am National Jewish Health Center in Denver (Colorado) 2004 publizierten. Demnach erkranken 75 Prozent der Patienten mit atopischem Ekzem auch an Heuschnupfen und 50 Prozent an Asthma.

Obwohl Nahrungsmittelallergien unabhängig von der atopischen Trias auftreten, dürften ihnen doch weit gehend dieselben Mechanismen zu Grunde liegen. Ich selbst reagiere stark allergisch auf verschiedene Früchte und Gemüse wie Äpfel, Kirschen, Kiwis, Bananen, Ananas, Karotten, Tomaten und sogar Wassermelonen. Bei eigenen Recherchen fand ich heraus, dass die Ursache vermutlich eine Kreuzreaktivität ist, die man als orales Allergiesyndrom bezeichnet.

Bestimmte Pollenproteine, zum Beispiel solche der Beifuß-Ambrosie und das Birkenpollenallergen Bet v1, rufen bei vielen Menschen Heuschnupfen und Asthma hervor. Oft führen sie zusätzlich zu einer Sensibilisierung gegenüber gewissen Früchten und Gemüsesorten, auf die Patienten mit oralem Allergiesyndrom dann mit der Bildung von IgE-Antikörpern reagieren – statt den sonst üblichen Immunglobulinen vom Typ G4, die eine Toleranz gegen Allergene vermitteln. Der Grund ist eine immunologische Kreuzreaktion zwischen den Pollenbestandteilen und bestimmten strukturell verwandten Proteinen in Nahrungsmitteln, zu denen etwa das in Äpfeln enthaltene Mad d1 zählt. Wenn gegen Pollen gerichtete IgE-Antikörper diese Proteine in Nahrungsmitteln erkennen, führt das an der Mundschleimhaut zu IgE-vermittelten Sofortreaktionen wie Rötung, Schwellung und Brennen sowie unter Mitwirkung von Th2-Zellen zu sich langsamer entwickelnden Entzündungen wie der Neurodermitis.

Eingeschränkte Schutzfunktion der Haut

Aber nicht nur solche Kreuzreaktionen verknüpfen die diversen Allergieformen miteinander. Ein weiteres Bindeglied ist die Beschaffenheit der Haut. Normalerweise stellt sie die erste Verteidigungslinie gegen Infektionen dar. Schon länger vermuten Forscher, dass Störungen ihrer Barrierefunktion und mangelnde Feuchtigkeit die Sensibilisierung gegenüber Allergenen sowie Entzündungsreaktionen begünstigen. Die für Patienten mit Neurodermitis typische trockene, gerötete und rissige Haut fördert den Kontakt zwischen Umweltallergenen und Immunzellen, die Th2-vermittelte Reaktionen in Gang setzen und am Laufen halten.

Manchmal kommt es mir tatsächlich so vor, als sei meine Haut kein sonderlich wirksamer Schutzwall gegen die Außenwelt. Sie ist ungewöhnlich trocken, und selbst kleinste Verlet-

zungen an Beinen, Händen und Füßen können sich zu langwierigen Entzündungsherden entwickeln. Während schwererer Neurodermitisschübe verschlimmern sich oft auch meine Nahrungsmittelallergien und mein Asthma. Doch welche molekularen Mechanismen stecken hinter diesem Zusammenhang?

»Die Gemeinsamkeiten zwischen den Erkrankungen der atopischen Trias sprechen klar dafür, dass sich die zu Grunde liegenden Mechanismen ähneln«, meint Steven Ziegler, Leiter der Abteilung für Immunologie am Benaroya-Forschungsinstitut in Seattle (Washington). Sein Team und andere Forschergruppen haben herausgefunden, dass erhöhte Konzentrationen eines Zytokins namens thymisches stromales Lymphopoietin (TSLP) im Blut ein gemeinsames Merkmal der drei Allergiearten sind. »Menschen mit der atopischen Trias bilden mehr TSLP – ein Befund, der sich übrigens auch im Mausmodell zeigt. Und die Blockade des TSLP kann verhindern, dass die Tiere erkranken«, erklärt der Forscher.

Die äußersten Zellschichten der Haut produzieren bei Neurodermitis große Mengen an TSLP, besonders in den chronisch betroffenen Arealen. Das fördert lokale Th2-vermittelte Entzündungsreaktionen. Laut einer Untersuchung von 2007 setzen menschliche Epithelzellen bei Infektionen oder Verletzungen TSLP frei. Das könnte erklären, warum sich selbst winzige Risse in meiner Haut zu Ekzemen auswachsen: Das TSLP-Protein, das als Folge der mechanischen Schädigung in großen Mengen entsteht, löst eine örtliche Entzündungsreaktion aus. Versuche mit Mäusen zeigten zudem einen Zusammenhang zwischen der TSLP-Produktion in den obersten Zellschichten von Haut, Darm oder Lunge und einer erhöhten Zahl von basophilen Leukozyten in Milz, Blut und Knochenmark auf. Dort vermitteln diese Immunzellen systemische allergische Reaktionen.

Vor einem Jahr berichteten Mark Siracusa, Immunologe an der University of Pennsylvania in Philadelphia, und seine Kollegen, dass eine durch TSLP gesteigerte Aktivität der basophilen Granulozyten bei Mäusen den IgE-Spiegel im gesamten Körper anhebt und allergische Entzündungsreaktionen verursacht. Wie die Forscher weiter feststellten, erhöhen die derart angeregten Granulozyten ganz allgemein die Bereitschaft zu Th2-vermittelten Reaktionen.

Insgesamt zeigen diese Befunde also: Die abnorme TSLP-Produktion an einer Grenzfläche zwischen Organismus und Umgebung fördert die Vermehrung, Mobilisierung und Aktivierung von Immunzellen, die Allergien im ganzen Körper auslösen. Das macht verständlich, warum beim Kontakt zwischen einem allergenen Nahrungsmittel (wie Wassermelonen) und meiner Darmschleimhaut (einer Grenzfläche zur von außen kommenden Nahrung) meine Ekzeme aufblühen oder ein Neurodermitisschub (an der Haut als Grenzfläche) mein Asthma verschlimmert.

Demnach bietet sich TSLP auch als neuer Ansatzpunkt für Medikamente an. Michishige Harada vom Laboratorium für Atemwegserkrankungen am Institut für Physikalische und Chemische Forschung in Kanagawa (Japan) und seine Kollegen berichteten schon 2009, dass eine Variante von TSLP in Zellen der Bronchialschleimhaut die Proteinproduktion ankurbelt, wenn beispielsweise Viren die Atemwege befallen. 2011 publizierte die gleiche Arbeitsgruppe Untersuchungen, wonach Gene, die für besonders lange TSLP-Varianten kodieren, Asthma Vorschub leisten. Auf diese Befunde, die das thymische stromale Lymphopoietin als hauptverantwortlich für die Erweiterung des Allergiespektrums beim atopischen Marsch erscheinen lassen, stützen sich derzeit laufende klinische Studien der Phase II mit einem TSLP-Hemmer.

»Solange es keine Medikamente gibt, die das Asthma heilen, brauchen wir Wirkstoffe, die den atopischen Marsch stoppen«, betont Leung. TSLP-Hemmer hält er angesichts der aktuellen Forschungsergebnisse für besonders aussichtsreiche Kandidaten. Leider kommen die neuen Erkenntnisse zu spät, um mich vor den traumatischen Folgen meiner Übernachtung auf dem Katzenkissen zu bewahren. Die Eltern von Kindern mit ersten Anzeichen einer Atopie sollten jedoch sehr aufmerksam verfolgen, was es in nächster Zeit an Neuigkeiten über die TSLP-Hemmer gibt. ~

DIE AUTORIN

Paige Brown ist freie Wissenschaftsjournalistin und lebt in Baton Rouge (Louisiana).

QUELLEN

Allakhverdi, Z. et al.: Thymic Stromal Lymphopoietin Is Released by Human Epithelial Cells in Response to Microbes, Trauma, or Inflammation and Potently Activates Mast Cells. In: Journal of Experimental Medicine 204, S. 253–258, 2007

Geroldinger-Simic, M. et al.: Birch Pollen-Related Food Allergy: Clinical Aspects and the Role of Allergen-Specific IgE and IgG4 Antibodies. In: Journal of Allergy and Clinical Immunology 127, S. 616–622, 2011

Harada, M. et al.: Thymic Stromal Lymphopoietin Gene Promoter Polymorphisms Are Associated with Susceptibility to Bronchial Asthma. In: American Journal of Respiratory Cell and Molecular Biology 44, S. 787–793, 2011

Platts-Mills, T. A., Woodfolk, J. A.: Allergens and their Role in the Allergic Immune Response. In: Immunological Reviews 242, S. 51–68, 2011

Siracusa, M. C. et al.: TSLP Promotes Interleukin-3-independent Basophil Haematopoiesis and Type 2 Inflammation. In: Nature 477, S. 229–233, 2011

Zheng, T. et al.: The Atopic March: Progression from Atopic Dermatitis to Allergic Rhinitis and Asthma. In: Allergy Asthma Immunological Research 3, S. 67–73, S. 2011

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1168622**

© Nature Publishing Group
www.nature.com
Nature 479, S. S14–S15

Allergien auf dem Vormarsch

Wir werden immer anfälliger für Überempfindlichkeitsreaktionen. Trägt nur verbesserte Hygiene die Schuld – oder gibt es noch andere Ursachen?

Von Duncan Graham-Rowe

Warum haben Asthma, Neurodermitis und Nahrungsmittelallergien in den letzten Jahrzehnten so stark zugenommen? Die Hygienehypothese erklärt dies so: Kinder hätten relativ wenig Kontakt mit Erregern – für ihr erst heranreifendes Immunsystem zu wenig. Aber lässt sich die Allergieexplosion wirklich so einfach erklären? Mittlerweile zeichnet sich ab, dass die Sache wohl doch erheblich komplizierter ist.

Zwar erhöht unsere moderne Lebensart anscheinend tatsächlich das Allergierisiko. Doch Forschungen zufolge liegt das nicht nur an übertriebener Sauberkeit und Hygiene. Denn wie sich anzudeuten scheint, nehmen die gesamten äußeren Umstände auf ein reifendes Immunsystem Einfluss: etwa der Ort, wo das Kind aufwächst, seine Ernährung und die Geschwisterzahl. Vermutlich geht es nämlich nicht nur darum, dass dem Immunsystem die Auseinandersetzung mit potenziellen Krankheitserregern und Allergenen fehlt, sondern auch um das empfindliche Gleichgewicht zwischen dem Körper und den vielen ihn besiedelnden Mikroorganismen (siehe »Tausend Billionen Freunde«, SdW 11/2012, S. 26). Unsere Evolution lief im Zusammenspiel mit diesen ab, und das Immunsystem hält sich durch sie in Balance.

Dass zu wenig Schmutz – genauer Kontakt mit Erregern – womöglich Allergien fördert, brachte 1989 der Epidemiologe David Strachan ins Gespräch, der heute an der St George's University of London arbeitet. Den Begriff »Hygienehypothese« verwendete Strachan damals nicht – wie er auch betont, dass es ihm um eine viel engere Fragestellung ging. An sich war die Idee nicht neu. Der Mediziner wollte wie andere Forscher auch verstehen, warum zwar viele Krankheiten dank sauberen Wassers, verbesserter Sanitäreinrichtungen und Abwasserkanalisation, durch Impfungen und medizinische Fortschritte selten geworden waren, jedoch andererseits Allergien deutlich zunahmen. Und wieso betraf dies vornehmlich Industrieregionen und städtische Ballungsräume?

Tatsächlich treten Allergien in vielen westlich geprägten Ländern heute 20-mal öfter auf als noch Mitte des 20. Jahrhunderts – auch wenn sich der Häufigkeitsgrad durchaus unterscheidet. So leidet in einigen Gebieten Neuseelands, Australiens und der USA 40 Prozent der Bevölkerung an Asthma. Und die Neurodermitisrate ist in manchen Industrieländern dramatisch angestiegen. Inzwischen scheinen die Quoten in den westlich geprägten Staaten seit einiger Zeit nicht mehr stark zu wachsen. Dafür nehmen sie nun rapide in Schwellenländern zu, deren Lebensweisen und Hygienebedingungen sich westlichen Standards annähern.

Strachan brachte das Phänomen erstmals in Zusammenhang mit der immer geringeren Kinderzahl in Familien. Er hatte an über 17 000 britischen Kindern des Jahrgangs 1958, die alle in derselben Woche im März geboren waren, bis ins Erwachsenenalter erfasst, ob sie Heuschnupfen, Neurodermitis und dergleichen bekamen. Dabei entdeckte er, dass Heuschnupfen umso seltener auftrat, je mehr ältere Geschwister vorhanden waren. Seine Schlussfolgerung damals: Vielleicht wirkten frühe Infektionen vorbeugend, die sich das Kind direkt durch seine Geschwister zugezogen oder sogar schon im Mutterleib miterlebt hatte. Schließlich erhöht sich bei mehreren Kindern das Spektrum eingeschleppter Keime.

Noch gut erinnert sich Strachan daran, wie kritisch Immunologen die Botschaft zunächst aufnahmen. Damals galt, dass Infektionen Allergien eher den Weg bereiten, als dass sie ihr Auftreten verhindern. Der Widerstand wich erst nach 1992 mit der Entdeckung eines Immunmechanismus, der die neue Idee plausibel erscheinen ließ.

Im Kern geht es um eine gestörte Balance zwischen verschiedenen weißen Blutzellen, und zwar speziell um das Ver-

AUF EINEN BLICK

DER UMWELTBEITRAG

1 In den **Industrienationen** gibt es heute sehr viel mehr Allergiekinder als früher. Als mögliche Ursache ist schon seit Längerem die **verbesserte Hygiene** im Gespräch.

2 Neuere Untersuchungen sprechen dafür, dass diese Sichtweise zu eng ist. Demzufolge sind zusätzlich die geringere Kinderzahl in den Familien, die viele vor dem Fernseher verbrachte Zeit und auch falsche Vorsicht vor Nahrungsmitteln auslösende Faktoren – kurz: der **moderne westliche Lebensstil**.

DREAMSTIME / SEBASTIAN CZAPNIK

Schon in früher Kindheit, sogar bereits in der Schwangerschaft, wird Allergien der Weg gebahnt – eine Kehrseite modernen Lebens, mit Medienkonsum von der Wiege an.

hältnis von zwei Sorten so genannter T-Helferzellen der Immunabwehr, die als Th1 und Th2 bezeichnet werden. Gegen Bakterien und Viren treten vornehmlich Th1-Zellen auf den Plan, die ein Freisetzen verschiedener Immunbotenstoffe veranlassen, was die Bekämpfung solcher Erreger anstachelt. Tierversuche zeigten allerdings auch, dass diese Immunantwort die Reaktivität der Th2-Helferzellen herabsetzt. Die aber steuern die Produktion von Immunglobulin E (IgE) – eine Antikörperklasse, die auf häufige Allergene anspricht.

Ost-West-Vergleich: Ungewollte Testbedingungen

Das passte zu Strachans Vermutung: Eine eher geringe Konfrontation mit Krankheitskeimen in der frühen Kindheit müsste bedeuten, dass die Th1-Reaktion wenig gefordert wird. Deswegen würde die Th2-Reaktion ungenügend gebremst und entsprechend überschießen.

Bald mehrten sich Hinweise auf einen solchen Zusammenhang mit Allergien, und binnen Kurzem etablierte sich dafür der Begriff »Hygienehypothese«. So zeigte ein Team um Anne Wright von der University of Arizona in Tucson, dass Kinder, die im ersten halben Jahr eine Tageskrippe besucht hatten, seltener Neurodermitis und Asthma bekamen. Forscher untersuchten nun auch, wieso ausgerechnet Bauernkinder weniger Allergien entwickelten (Kasten S. 36 oben). Und schließlich brachten sie die gleichen Immunvorgänge in Beziehung zu verschiedenen Autoimmunkrankheiten wie multipler Sklerose, entzündlichen Darmerkrankungen, Morbus Crohn und Typ-1-Diabetes.

Der Fall der innerdeutschen Grenze 1989 bot eine einmalige Gelegenheit, den Einfluss der verschiedenen Lebensverhältnisse in Ost und West zu vergleichen. In den 1990er Jahren führte die Kinderärztin und Allergologin Erika von Mutius von der LMU München hierzu eine Anzahl von Untersuchungen durch. Obwohl die Umweltverschmutzung im Osten viel höher gewesen war, litten Kinder dort deutlich seltener an Asthma oder Neurodermitis als Kinder in Westdeutschland. Ähnliches ergaben Vergleichsstudien mit Polen oder Estland auf der einen und Schweden auf der anderen Seite. Genetisch gesehen sind jene Bevölkerungen recht ähnlich, aber sie hatten vier Jahrzehnte lang unter völlig anderen ökonomischen und ökologischen Verhältnissen gelebt.

Im Zentrum solcher Forschungen stehen meist Asthma und Neurodermitis. Ob ein ähnlicher Zusammenhang für Nahrungsmittelallergien gilt, die ebenfalls zunehmen, ist vorerst unklar. Doch eine Verbindung zwischen den verschiedenen Allergiearten scheint es zu geben. Offensichtlich spielen bei Allergien gegen Nahrungsinhaltsstoffe genetische Veranlagungen mit, ebenfalls aber Umweltfaktoren wie die Ernährung, Antibiotika und Hygienestandards, erläutert Clare Mills vom Institute for Food Research in Norwich (Großbritannien). Denn Letztere nähmen Einfluss auf die Darmflora. Deren Zusammensetzung könne bei einer besonders sauberen Umwelt eine ganz andere sein, und das bereite Allergien unter Umständen den Weg.

Zur Häufigkeit von Nahrungsmittelallergien gibt es noch wenig Daten, gerade für Schwellenländer. Das Projekt EuroPrevall – das Mills eine Zeit lang leitete –, befasst sich mit der

Geschützt auf dem Bauernhof

Landärzte hatten es schon lange bemerkt: Bauernkinder bekamen selten Heuschnupfen. 1999 untermauerte die Epidemiologin Charlotte Braun-Fahrländer von der Universität Basel dies mit einer Studie. Erika von Mutius von der Kinderklinik der LMU München zeigte dann, dass das Allergierisiko für ein Kind, das auf einem Bauernhof aufwächst, oft nur ein Drittel dessen von Stadtkindern und sogar von anderen Landkindern beträgt.

Eine mögliche Erklärung dafür fand Roger Lauener von der Universitäts-Kinderklinik Zürich zusammen mit von Mutius 2002: Immunzellen der Bauernkinder trugen mehr TLR2 genannte Rezeptoren (»toll-like«-Rezeptoren der Klasse 2). Das Oberflächenprotein bindet an Mikroorganismen und aktiviert das angeborene Immunsystem (siehe SdW 8/2005, S. 68 und Nobelpreis: »Wachposten des Immunsystems«, 12/2011, S. 15). Aber keines dieser Kinder zeigte Zeichen eines Infekts, auch war die Anzahl der weißen Blutzellen normal. Die Erklärung für das Paradox scheint auf genetischer Ebene zu liegen: Offenbar bewirken die Mikroorganismen, dass Immunzellen jene Rezeptoren vermehrt erzeugen – auch ohne dass das Kind eine Infektion durchmacht.

Jener Schutz bildet sich laut von Mutius durch den Kontakt zu Tieren, aber auch durch Trinken von nicht pasteurisierter Milch. In mehreren Studien fand sich eine Wirkung von Rohmilch hinsichtlich Asthma, Neurodermitis, Heuschnupfen und Allergiesensibilisierung. Nach anderen Untersuchungen kann sich die Schutzwirkung sogar auf das Ungeborene übertragen, wenn die Schwangere mit Tieren umgeht oder nicht pasteurisierte Milch trinkt. Bei den Kindern hielt der Effekt mindestens zwei Jahre an.

Vermutlich kommt es dabei nicht auf bestimmte Mikroorganismen an, sondern auf deren Vielfalt. Nach von Mutius sind Kinder auf einem Bauernhof einem weit größeren Spektrum an Mikroben ausgesetzt als anderswo. Die Ärztin fand eine gegenläufige Korrelation zwischen der mikrobiellen Vielfalt und dem Asthmarisiko. Auch Molkeproteine – die bei Erhitzen zerstört werden – scheinen die Asthmagefahr zu vermindern.

Allergieproblematik in Europa, betrachtet dazu aber auch Indien und China. Die beteiligten Forscher untersuchen die Auswirkungen von sozioökonomischen Aspekten, der Ernährungsweise, dem Lebensstil und von geografischen Unterschieden auf das Allergierisiko. Mills hält die Ergebnisse aus Asien für sehr aufschlussreich. Dort, und besonders in Indien, gäbe es praktisch keine Nahrungsmittelallergien. Die Ausnahme sei das hoch entwickelte Hongkong. Da glichen die Raten eher dem Westen, völlig anders als im übrigen China.

Langzeitforschungsprojekte in den Schwellenländern verzeichnen inzwischen Allergiezunahmen mit steigendem Wohlstand eines Landes oder Lebensraums. Beispielsweise leitete Emmanuel Addo-Yobo vom Komfo-Anokye-Lehrkrankenhaus in Kumasi (Ghana) eine Zehnjahresstudie, bei der Strachan und Adnan Custovic von der University of Manchester mitwirkten. An Kindern aus reicheren und armen Stadtgebieten sowie vom Land verglichen die Forscher die Neigung zu angeborenen Überempfindlichkeitsreaktionen – Atopien – und belastungsabhängigem Asthma. Tatsächlich traten in Ghana beide Allergieformen zusammen am häufigsten bei Stadtkindern der wohlhabenderen Mittelschicht auf.

Konträre Befunde erweitern das Erklärungsschema

Aber nicht alle Ergebnisse solcher Studien fügen sich in die Hygienehypothese. Das stark urbanisierte Japan, das auf Sauberkeit und Ansteckungsschutz viel Wert legt, verzeichnet eine viel geringere Asthmarate als die Vereinigten Staaten oder Australien. Und in den USA steigt der Anteil von Asthmakindern gerade in Armenvierteln und bei dürftigen Wohnverhältnissen. Sehr oft tritt Asthma anscheinend auch auf der Karibikinsel Barbados bei Bevölkerungsgruppen auf, die an Hauptdurchgangsstraßen leben und deren Wohnungen hohe Konzentrationen bakterieller Toxine aufweisen.

Thomas Platts-Mills von der University of Virginia in Charlottesville zufolge verschleiert das Schlagwort Hygiene eher die Zusammenhänge, weil es zu einer zu engen Sichtweise verleitet. An sich hält der frühere Präsident der Ameri-

Der Wurmfaktor

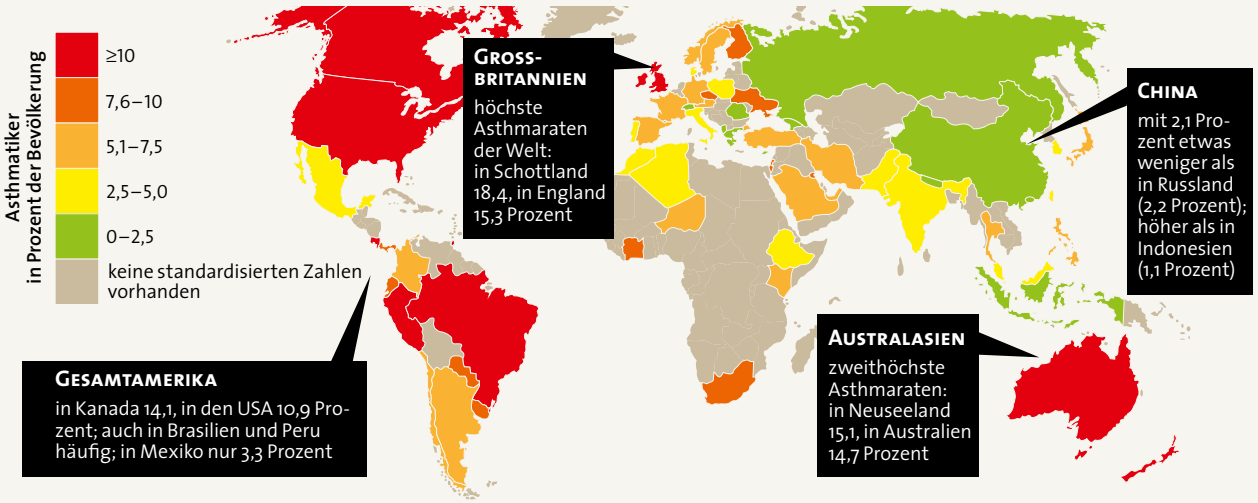
Schutz vor Allergien dank Parasiten klingt merkwürdig. Aber während die Menschen in wenig entwickelten Ländern oft noch unter Würmern und dergleichen leiden – etwa unter Filariose und Schistosomiasis –, gibt es solche Krankheiten in den Industrienationen kaum noch.

So sehr deren Verschwinden medizinisch gesehen zu begrüßen ist, scheint damit doch auch ein wichtiger Faktor gegen Allergien verloren gegangen zu sein. Einen Zusammenhang vermuteten Mediziner schon, bevor die Hygienehypothese aufkam. Denn Immunzellen bilden bei Bilharziose mehr Rezeptoren vom Typ TLR2, wie Maria Yazdanbakhsh von der Universität Leiden bei Studien in Ghana nachwies – ein ähnlicher Befund, wie man ihn in Europa bei Kindern von Bauernhöfen fand (siehe Kasten oben). Anscheinend stählen die Organismen, die unsere Evolution eng begleitet haben, unser Immunsystem.

Mit der Ausrottung von Wurmkrankheiten wächst die Neigung zu Neurodermitis. Das zeigten Untersuchungen in Gabun, Venezuela und Vietnam. Nach einer Erhebung von Harriet Mpairwe von der Uganda Research Unit on AIDS kann das auch Kinder betreffen, deren Mutter als Schwangere eine Wurmbehandlung erhielt. Anscheinend vermag sie den Schutzfaktor auf den Fötus zu übertragen.

Asthma weltweit: Ungleiche Verteilung

Anscheinend fördert die westliche Lebensweise das Auftreten von Asthma.



NATURE, NACH: MASOLI, M. ET AL.: THE GLOBAL BURDEN OF ASTHMA – SUMMARY IN: ALLERGY 59, S. 469–478, 2004

can Academy of Allergy, Asthma and Immunology die Sauberkeitshypothese für plausibel. Doch unser Leben habe sich noch in anderer Hinsicht verändert. Es sei vermutlich kein Zufall, dass in den USA die Asthmafälle zu steigen begannen, seit das Fernsehen Kindersendungen bringt. Vor 1955 hätten Schulkinder nachmittags draußen gespielt und herumgetobt. Heutzutage würden sie viel mehr in der Wohnung bleiben und sich wenig bewegen. So viel Stillsitzen habe es bei Kindern früher nicht gegeben.

Das hält Platts-Mills insofern für bedeutsam, als seine Forschungsgruppe herausfand, dass Menschen beim Fernsehen seltener tiefe Atemzüge machen als selbst beim Lesen. Leider tue das der glatten Muskulatur der Bronchien nicht gut, denn die Lungen müssten regelmäßig gedehnt und kräftig beansprucht werden. Andernfalls würden unspezifische Bronchialreizungen auftreten. Wenn Kinder viel vor dem Fernseher hockten, wenig herumtollten – also ihre Lungen kaum trainierten – und noch dazu in Wohnungen mit Teppichböden lebten, die nun einmal von Hausstaubmilben wimmelten, sei Asthma schon fast programmiert.

Auf einen weiteren Aspekt der Lebensführung verweist der Kinderhautarzt Carsten Flohr vom St Thomas' Hospital in London. Trotz Hinweisen, dass eine vielseitige Ernährung in der frühen Kindheit das Risiko für Nahrungsmittelallergien verringert, verhalten sich Eltern in Industrienationen damit sehr vorsichtig. Sie glauben, ihr Kind schützen zu können, wenn sie ihm bestimmte Lebensmittel zunächst vorenthalten. Gerade das könnte die Situation aber verschärfen.

Auch Strachan hält die Bezeichnung Hygienehypothese für überholt. Der Begriff würde den wissenschaftlichen Erkenntnissen nicht mehr gerecht. Zwar ließe sich die Zunahme von Allergien nach wie vor am ehesten durch die mangelnde Konfrontation mit Erregern erklären. Ebenso hält Strachan die Schlussfolgerungen zur Geschwisterzahl für stimmig. Aber seiner Ansicht nach sollte man die Allergieursachen dem westlichen Lebensstil überhaupt zuschreiben, also einem viel breiteren Spektrum an Einflussfaktoren.

Natürlich verlangt nun niemand von den Menschen der Industrieländer, allesamt aufs Land zu ziehen und Bauern zu werden. Genauso unsinnig wäre es, sich nur wegen eines besseren Allergieschutzes mehr Kinder zuzulegen. Dass unser moderner städtischer Lebensstil Allergien befördert, wird allerdings zunehmend deutlicher.

DER AUTOR

Duncan Graham-Rowe ist Wissenschaftsjournalist und lebt in Brighton, Großbritannien.

QUELLEN

Beasley, R. et al.: Worldwide Variation in Prevalence of Symptoms of Asthma, Allergic Rhinoconjunctivitis, and Atopic Eczema: ISAAC. In: Lancet 351, S. 1225–1232, 1998

Peat, J. K. et al.: Prevalence and Severity of Childhood Asthma and Allergic Sensitisation in Seven Climatic Regions of New South Wales. In: The Medical Journal of Australia 163, S. 22–26, 1995

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1168623**

© Nature Publishing Group
www.nature.com
Nature 479, S. 2–3, 24. November 2011

Wenn im Essen der Tod lauert

In klinischen Studien untersuchen Forscher, ob sich Allergiker vor potenziell tödlichen Immunreaktionen gegen Lebensmittel schützen lassen – indem sie behutsam daran gewöhnt werden.

Von Rebecca Kessler

Eine Frühlingsrolle können die meisten Menschen bedenkenlos essen; doch für Allergiker lauert zwischen ihren knusprigen goldenen Teigschichten unter Umständen der Tod. Bei ihnen kann Erdnussbutter, die manchmal zum Abdichten der mit Fleisch und Gemüse gefüllten Zwischenräume dient, einen anaphylaktischen Schock auslösen: Binnen Minuten zeigt sich ein Hautausschlag, Lippen, Zunge und Rachen beginnen zu jucken und schwellen an. Im schlimmsten Fall fällt der Blutdruck ab, der Betroffene bekommt keine Luft mehr, verliert das Bewusstsein und stirbt.

Die Häufigkeit von Nahrungsmittelallergien hat in den westlichen Industrieländern stark zugenommen. Wie eine im Juni 2011 veröffentlichte Studie der Northwestern University in Chicago (Illinois) ergab, reagieren inzwischen acht Prozent der Kinder in den USA auf mindestens ein Nahrungsmittel allergisch. Ähnliche Zahlen werden aus Kanada, Großbritannien, Frankreich und Norwegen berichtet. In Deutschland schätzen Experten den Anteil auf zwei bis sechs Prozent.

Doch nicht nur die Zahl der Allergiker steigt. Sie reagieren auch auf mehr Nahrungsmittel als noch vor wenigen Jahrzehnten. So bleiben Allergien gegen Milchprodukte und Eier, die früher fast nur bei Vorschulkindern vorkamen, heute oft bis ins Erwachsenenalter bestehen.

AUF EINEN BLICK

ALTE RATSCHLÄGE ÜBERHOLT

1 Anders als Mediziner lange dachten, lassen sich **Nahrungsmittelallergien** nicht dadurch verhüten, dass man Kinder schon im Embryonal- und Säuglingsstadium vor möglichen Auslösern schützt.

2 Mehr Erfolg scheint eine **orale Desensibilisierung** zu versprechen. Dabei nimmt das Kind ab dem zweiten Lebensjahr Nahrungsmittelallergene **in kontrollierten Dosen** mit dem Essen zu sich.

Nahrungsmittelunverträglichkeiten, die zu den häufigsten Auslösern anaphylaktischer Reaktionen zählen, verursachen auch beträchtliche ökonomische Schäden: Durch sie entstanden laut einer Studie der Virginia Commonwealth University in Richmond vom April 2011 im Jahr 2007 allein in den USA Kosten in Höhe von 510 Millionen Dollar für die medizinische Versorgung der Betroffenen und als Folge von Produktivitätseinbußen.

Konfrontieren besser als abschirmen

Leidet ein Säugling an Hautausschlägen oder anderen Erkrankungen, die mit Allergien zusammenhängen, oder ist ein Geschwister oder Elternteil Allergiker, wird er höchstwahrscheinlich auch eine Lebensmittelallergie entwickeln. Unter diesen Umständen hieß es bis vor Kurzem, die Mütter sollten während der Schwangerschaft und Stillzeit allergene Nahrungsmittel meiden, das Kind für vier bis sechs Monate ausschließlich stillen und ihm frühestens im Alter von zwei bis drei Jahren Lebensmittel zu essen geben, die möglicherweise Allergien hervorrufen. »Dahinter stand die Idee, das Kleinkind in eine Art immunologischen Kokon einzuspinnen und es allergieauslösenden Proteinen gar nicht erst auszusetzen«, erläutert Gideon Lack, Professor für pädiatrische Allergologie am King's College London.

Aktuelle Forschungsergebnisse wecken jedoch den Verdacht, dass dieses Vorgehen völlig falsch sein könnte. »Möglicherweise erreichen wir mit der Vermeidungsstrategie genau das Gegenteil von dem, was wir eigentlich anstreben«, sagt Lack. Das geht etwa aus einer 2008 publizierten Untersuchung hervor, an der er mitgewirkt hat. Demnach leiden Kinder in Israel zehnmal seltener an Erdnussallergien als in Großbritannien, obwohl sie sehr viel mehr erdnusshaltige Nahrungsmittel verzehren als ihre britischen Altersgenossen.

Auf Grund solcher Befunde änderte die American Academy of Pediatrics im Jahr 2008 ihre Ernährungsratschläge. Den überarbeiteten Leitlinien nach gibt es keine ausreichende wissenschaftliche Grundlage, um Einschränkungen bei

JONATHAN BURTON

Allergien gegen Erdnüsse sind weit verbreitet. Sollten Mütter in allergiebelasteten Familien während der Schwangerschaft und Stillzeit vorsorglich auf sie verzichten, damit ihre Kinder nicht schon im Embryonal- oder Säuglingsstadium dagegen sensibilisiert werden? Nach neuen Erkenntnissen ist das unnötig – und vielleicht sogar falsch.

der Ernährung für schwangere und stillende Mütter oder mehr als ein halbes Jahr alte Kinder zu empfehlen. Das britische Gesundheitsministerium schloss sich 2009 dieser Auffassung an. Im gleichen Jahr hat auch in Deutschland das Aktionsbündnis Allergieprävention seine Ratschläge von 2004 umgearbeitet und empfiehlt nicht länger, Risikokinder in den ersten Lebensjahren möglichst keinen Nahrungsmittelallergenen auszusetzen – eine Position, die das Bundesamt für gesundheitliche Aufklärung heute ebenfalls vertritt.

»Manche Mütter eines Kindes mit Erdnussallergie sagen: ›Ich gebe meinem (nächsten) Kind lieber keine erdnusshaltigen Nahrungsmittel.‹ Tatsächlich existieren Untersuchungsbefunde, wonach dies die angemessene Vorgehensweise ist. Anderen Mütter erscheinen derlei Vorsichtsmaßnahmen dagegen übertrieben oder gar abträglich, und auch für diese Auffassung lassen sich Studienergebnisse anführen«, erklärt Hugh Sampson, Direktor des Jaffe Food Allergy Institute an der Mount Sinai School of Medicine in New York und Spezialist für Allergien bei Kindern. »Wir müssen unbedingt vermeiden, dass sich die Mütter wegen ihrer Entscheidung schuldig fühlen, denn niemand weiß derzeit wirklich, was das Beste ist.«

Die nach wie vor offene Frage, ab wann und ob überhaupt Kleinkinder potenziellen Allergenen ausgesetzt werden können, sollen drei derzeit laufende große Studien klären. Lack leitet eine davon namens LEAP (Learning Early About Peanut Allergy). An ihr nehmen 640 Kleinkinder teil, von denen etwa die Hälfte ein hohes Allergierisiko hat. Ziel ist, herauszufinden, ob der Verzehr erdnusshaltiger Nahrungsmittel im Kleinkindalter die Entwicklung einer Allergie fördert. Die

Untersuchung hat 2006 begonnen, erste Ergebnisse werden nächstes Jahr erwartet.

Lack leitet zudem die Studie EAT (Enquiring About Tolerance), deren Abschluss für 2015 geplant ist. Hier vergleichen die Forscher Säuglinge, die bis zum Alter von sechs Monaten ausschließlich gestillt wurden, mit solchen, die ab dem vierten Lebensmonat zusätzlich sechs potenziell allergieauslösende Nahrungsmitteln zu essen bekamen.

Die dritte Studie soll aufzeigen, welche Rolle die Ernährung der werdenden Mutter während der Schwangerschaft spielt. Sie verfolgt den Gesundheitszustand von 500 Säuglingen, die allergisch gegen Milch oder Eier sind und damit ein hohes Risiko haben, auch eine Erdnussallergie zu entwickeln. 2010 publizierte Zwischenergebnisse scheinen die Kokon-Hypothese zu stützen, wonach der Kontakt mit Allergenen möglichst zu vermeiden ist: Bei Säuglingen, deren Mütter während der Schwangerschaft Erdnüsse aßen, fanden sich mehr Antikörper gegen deren Bestandteile im Blut. Es bleibt jedoch abzuwarten, wie viele dieser Kinder auch tatsächlich eine Allergie gegen Erdnüsse entwickeln werden, sagt Sampson, der die Studie leitet.

> »Die orale Immuntherapie bei Nahrungsmittelallergien **wirkt in 80 Prozent der Fälle«**

Probleme mit der Desensibilisierung per Spritze

Schon vor 100 Jahren versuchten Mediziner, Allergiker zu heilen, indem sie ihnen den Auslöser ihres Leidens in steigenden Dosen verabreichten. Die Injektion der Allergene von Hausstaubmilben, Pollen oder Katzenhaaren ist immer noch eine übliche Methode zur Desensibilisierung. Bei Nahrungsmittelallergien ist jedoch größte Vorsicht geboten, weil die Immunreaktion sehr heftig ausfallen kann. Im Jahr 1991 starb ein 15-jähriger Teilnehmer einer Studie zur Injektionstherapie der Erdnussallergie an einer anaphylaktischen Reaktion. Das war ein Schock für das gesamte Forschungsgebiet.

Sehr zum Leidwesen von John Oppenheimer von der University of Medicine and Dentistry of New Jersey in Newark, der die Unglücksstudie leitete, leben auch heute, über 20 Jahre danach, die Patienten immer noch »im Schatten einer Zeitbombe«, da ein einziger Bissen der falschen Nahrung ihren Tod bedeuten kann. Allerdings lassen ihn neue Forschungsergebnisse hoffnungsvoller in die Zukunft blicken. »Heute kann ich meinen jungen Patienten nur den dringenden Rat geben, Erdnüsse strikt zu meiden«, sagt er. »Doch tröste ich sie mit der Aussicht, dass ich ihnen, bis sie ins College kommen, etwas Besseres anzubieten habe.«

Wenn es zu gefährlich ist, Nahrungsmittelallergene zu injizieren, könnte man sie den Patienten dann vielleicht in winzigen Dosen unter kontrollierten Bedingungen mit der Nahrung verabreichen? Tatsächlich wurde diese naheliegende Vorgehensweise jüngst mehrfach erprobt – mit positiven Ergebnissen. So berichteten im März 2011 Forscher von der University of Cambridge (Großbritannien) über eine Studie zur oralen Immuntherapie der Erdnussallergie bei 22 Kindern. Die Probanden hatten insgesamt 30 Wochen lang steigende Dosen von Erdnussmehl zu sich genommen. Das erhöhte ihre Toleranz gegenüber dem Allergen im Durchschnitt um das 1000-Fache – genug, damit der versehentliche Genuss von Erdnüssen keine Lebensgefahr mehr bedeutete. Nach Ende der Therapie tolerierten 14 der 22 Kinder selbst eine Allergenmenge, die 32 Erdnüssen entsprach. Weitere vier Kinder zeigte nur leichte bis mittelschwere Reaktionen.

Ebenfalls im März 2011 publizierten Forscher des Duke University Medical Center in Durham (North Carolina) unter Leitung von Wesley Burks erste Ergebnisse einer noch laufenden Studie zur oralen Immuntherapie einer Erdnussallergie. Nach einem Jahr Behandlungsdauer tolerierten alle 16 teilnehmenden Kinder das Äquivalent von 20 Erdnüssen, wobei nur eines leicht, die anderen gar nicht allergisch reagierten. Hingegen vertrugen fünf von neun Kindern, die zu Vergleichszwecken nur ein Placebo erhalten hatten, nach wie vor keine oder nur sehr wenige Erdnüsse – im Mittel eine einzige.

Im Mai 2011 veröffentlichte die Arbeitsgruppe von Sampson die Ergebnisse einer fünfjährigen Studie über eine ähnliche Desensibilisierungsmethode, die auch als natürliche Immuntherapie bezeichnet wird. Kinder mit Allergie gegen Milcheiweiß hatten dabei zunächst milchhaltige Muffins und Waffeln sowie später Käsepizza erhalten. Die Teigwaren wurden nach und nach bei immer geringeren Temperaturen gebacken. Am Ende vertrugen die Kinder ungekochte Milch 16-mal so gut wie die Teilnehmer der Kontrollgruppe.

Schließlich vermeldete im Juli dieses Jahres eine Gruppe um Burks, inzwischen an der University of North Carolina in Chapel Hill, den Erfolg einer oralen Immuntherapie für Hühnereiweiß. 40 dagegen allergische Kinder erhielten es in Pulverform über einen Zeitraum von 22 Monaten hinweg in stetig steigenden Dosen. Vier brachen den Versuch ab. Von den restlichen 36 tolerierten am Ende 30 eine Allergenmenge, die einem Hühnerei entsprach. Bei den 15 Kindern der Kontrollgruppe zeigte sich dagegen keinerlei Besserung.

Laut Sampson hat die orale Immuntherapie insgesamt bei etwa 80 Prozent der bislang damit behandelten Patienten funktioniert. Mit einer modifizierten Vorgehensweise lie-

DREAMSTIME / CHRIS LEACHMAN

Auch Frühlingsrollen sind für manche Allergiker tabu.

Häufigkeit von Nahrungsmittelallergien bei Kindern in Prozent			
		USA	Frankreich
Allergie gegen ein oder mehrere Nahrungsmittel		8,00	6,70
Allergie gegen:	Erdnüsse	2,02	0,55
	Milch	1,69	0,80
	Meeresfrüchte	1,38	0,36

ße sich vielleicht auch den übrigen 20 Prozent helfen. In klinischen Studien beobachteten Sampson, Lack und andere Forscher nämlich, dass die orale Desensibilisierung sicherer und wirksamer ist, wenn sie mit der Gabe von Omalizumab einhergeht, einem monoklonalen Antikörper, der zur Behandlung des allergischen Asthmas entwickelt wurde. Sein breiter Einsatz zu diesem Zweck wäre freilich extrem teuer: Legt man durchschnittliche US-amerikanische Großhandelspreise zu Grunde, entstünden Kosten von etwa 20 000 Dollar (15 000 Euro) pro Jahr und Patient.

Wissenschaftler prüfen auch die Verabreichung von Allergenen als Tropfen unter der Zunge oder in Form von Hautpflastern. Beides scheint laut Sampson zu weniger unerwünschten Reaktionen zu führen.

Orale Immuntherapie, chinesische Kräuter oder Wurmeier?

Grundsätzlich leidet die Aussagekraft aller erwähnten Studien zur oralen Immuntherapie daran, dass sie an relativ kleinen Gruppen durchgeführt wurden. Oft gab es zudem gar keine oder nicht genügend Kontrollpersonen, und die Beobachtungsdauer war insgesamt zu kurz, um langfristige Effekte der Therapie zu erfassen. Überdies bleibt die höhere Toleranz gegenüber dem Allergen nach dem Stopp der regelmäßigen Gabe normalerweise nicht bestehen. Meist verschwinde die Wirkung nach einer Woche bis zwei Monaten, sagt Sampson. »Das verstehen die wenigsten Leute«, erklärt Burks. »Sie sehen den Effekt der Desensibilisierung und denken, die Allergie sei damit dauerhaft geheilt.«

Um die Entwicklung einer sicheren Therapie von Nahrungsmittelallergien zu beschleunigen, versammelte die gemeinnützige Food Allergy Initiative (FAI) mit Sitz in New York im April letzten Jahres 40 Allergologen, Gesundheitspolitiker, Repräsentanten von Patientenorganisationen und Vertreter der amerikanischen Arzneimittelzulassungsbehörde FDA (Food and Drug Administration) an der Harvard Medical School in Cambridge (Massachusetts). Laut Mary Jane Marchisotto, Geschäftsführerin der FAI, bestand Einvernehmen darüber, dass die orale Immuntherapie bessere Erfolgsaussichten hat als diverse andere experimentelle Behandlungsformen – darunter ein Präparat aus chinesischen Kräutern, Eier eines parasitischen Wurms und bestimmte Impfstoffe. Deshalb startete die FAI eine Kampagne zur Organisation und Finanzierung einer Phase-III-Studie mit einigen hundert Patienten. Sie soll die wissenschaftlichen Grundlagen für die Zulassung der oralen Immuntherapie durch die FDA schaffen.

Sampson nahm an der Konferenz der FAI teil und erhält auch Forschungsmittel von der Organisation. Er schätzt, dass die genannte Studie binnen sieben Jahren zu einer arzneimittelrechtlich zugelassenen Therapie führen könnte. Seiner Ansicht nach ist das Präparat aus chinesischen Kräutern, das sein Team entwickelt, getestet und patentiert hat, jedoch ebenfalls eine viel versprechende Option und könnte vielleicht noch früher auf den Markt kommen. Seine Kollegen rekrutieren derzeit Probanden für Studien, in denen sie die Wirkung der Kräutermischung gegen eine Vielzahl von Nahrungsmittelallergien prüfen wollen. Im Erfolgsfall könnte das Präparat schon 2013 erhältlich sein. Denn da es sich formal um ein pflanzliches Nahrungsergänzungsmittel handelt, muss es nicht den langwierigen, strengen Zulassungsprozess der FDA durchlaufen, obwohl die Arbeitsgruppe längerfristig auch die FDA-Zulassung anstrebt.

So hoffnungsfroh die positiven Resultate der bisherigen Studien zur oralen Immuntherapie stimmen, ein Punkt macht Burks Sorgen: Ermutigt von den Erfolgsmeldungen, praktizieren einige Allergologen die orale Desensibilisierung inzwischen in Eigenregie. Ohne die sorgfältige Überwachung der Versuche an großen medizinischen Zentren sei das jedoch viel zu gefährlich. Besonders beunruhigt den Forscher der Gedanke, dass verzweifelte Eltern ihre allergiegeplagten Kinder gar zu Hause selbst behandeln. Er rät von solchen unkontrollierten Versuchen dringend ab, da es zu schweren allergischen Reaktionen kommen kann. »Derzeit sollte eine orale Immuntherapie ausschließlich unter Studienbedingungen durchgeführt werden«, mahnt er. »Das Verfahren ist noch nicht reif für die klinische Praxis.« ~

DIE AUTORIN

Rebecca Kessler ist freie Journalistin und lebt in Providence (Rhode Island).

QUELLEN

Burks, A. W.: Oral Immunotherapy for Treatment of Egg Allergy in Children. In: New England Journal of Medicine 367, S. 233–243, 2012

Patel, D. A. et al.: Estimating the Economic Burden of Food-Induced Allergic Reactions and Anaphylaxis in the United States. In: The Journal of Allergy and Clinical Immunology 128, S. 110–115, 2011

Smarr, C. B. et al.: Antigen-Fixed Leukocytes Tolerize Th2 Responses in Mouse Models of Allergy. In: The Journal of Immunology 187, S. 5090–5098, 2011

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1168624**

© Nature Publishing Group

www.nature.com
Nature 479, S. S8–S9

Was tun gegen Neurodermitis?

Entzündliche Hautausschläge bei Kleinkindern nehmen rapide zu. Oft bereiten sie den Weg für eine Allergikerkarriere – ein Grund, von Anfang an energisch dagegen vorzugehen.

Von Hywel Williams

Starkes Jucken und Hautrötungen – das sind die klassischen Anzeichen des so genannten atopischen Ekzems, besser bekannt unter der veralteten Bezeichnung Neurodermitis. An ihm leidet nach Daten der Internationalen Studie zu Asthma und Allergien im Kindesalter (ISAAC, International Study of Asthma and Allergies in Childhood) in den Städten inzwischen weltweit fast jedes fünfte Kind.

Der Ausdruck Neurodermitis unterstellt einen früher vermuteten, aber inzwischen widerlegten Zusammenhang mit dem Nervensystem. Freilich ist die neue Bezeichnung »atopisches Ekzem« ebenfalls irreführend. Die Diagnose stützt sich nämlich allein auf den Juckreiz, die sichtbaren Entzündungszeichen in den Hautfalten und die familiäre Vorgeschichte. Tatsächlich hat der ISAAC-Studie zufolge rund die Hälfte der Patienten gar keine so genannte Atopie, neigt also nicht zu Überempfindlichkeitsreaktionen: In ihrem Blut finden sich keine erhöhten Mengen von IgE-Antikörpern gegen häufige Umweltallergene.

MIT FREUNDL. GEN. VON HYWEL WILLIAMS

Fünfjähriger Junge mit atopischem Ekzem.

Nur die Kinder mit so schweren Ekzemen, dass sie im Krankenhaus behandelt werden müssen, sind meist wirklich Atopiker. Oft leiden sie zusätzlich unter allergischem Asthma oder Nahrungsmittelallergien – oder an beidem. Selbst wenn es in diesen Fällen gelingt, den Auslöser aufzuspüren und den Kontakt damit zu unterbinden, hilft das nur selten gegen den Ausschlag. Im Gegenteil: Ist ein Patient etwa allergisch gegen Katzenhaare oder Hausstaubmilben, kann der fortdauernde kontrollierte Kontakt mit dem Fremdstoff im Lauf der Zeit eine immunologische Toleranz erzeugen, durch die sich auch das Ekzem abschwächt. Übertriebene Sauberkeit oder nur gelegentliche Allergeneinwirkung scheint den Ausschlag dagegen eher zu verschlimmern – was auch erklärt, weshalb eine fremde Katze meist eine stärkere Reaktion hervorruft als die eigene. Großen Einfluss haben zudem Faktoren, die an sich gar keine Allergie auslösen: Temperaturextreme, trockene Winterluft, Klimaanlagen, Seifen und Shampoos, Schwitzen, scheuernde Kleidungsstücke, Infektionen mit *Staphylococcus aureus*, psychischer Stress und dauerndes Kratzen.

Die trockene Haut, die mit dem atopischen Ekzem einhergeht, ist großenteils genetisch bedingt. Möglicherweise erhöht sie die Empfindlichkeit gegenüber Allergenen oder Reizstoffen wie Seife. Beim Kontakt mit solchen Substanzen entzündet sich dann die Haut zunächst nur geringfügig. Das genügt, damit unter dem Einfluss weiterer Faktoren ein atopisches Ekzem entsteht. Dadurch wiederum kommt bei einem Teil der Patienten eine Kettenreaktion in Gang, in deren

AUF EINEN BLICK

QUÄLENDE HAUTAUSSCHLÄGE

1 Kinder mit Neurodermitis haben eine **ungewöhnlich trockene Haut**, die schon auf kleinste **Reizungen** – etwa durch Schweiß, Seife oder scheuernde Kleidung – mit **Entzündungen** reagiert.

2 Zur Vorbeugung helfen **Feuchtigkeitskremes**, welche die Barrierefunktion der Haut unterstützen, sowie die **Optimierung der Darmflora** mit Probiotika. Die Entzündung lässt sich mit **Kortikoidpräparaten** bekämpfen.

Verlauf schließlich auch Heuschnupfen und Asthma auftreten. Mit verantwortlich dafür scheint eine genetisch bedingte übermäßige Neigung zu entzündlichen Reaktionen zu sein.

Doch erbliche Faktoren erklären nicht, weshalb das atopische Ekzem gehäuft in besser gestellten, kleineren Familien vorkommt oder warum Kinder, die aus Ländern mit geringer in solche mit hoher Allergierate übersiedeln, plötzlich vermehrt an solchen Ausschlägen leiden. An den Genen kann es auch nicht liegen, dass atopische Ekzeme insgesamt rasant zunehmen, wie aus der ISAAC-Studie hervorgeht. Wahrscheinlich bestehen komplexe Wechselwirkungen zwischen Veranlagung und Umweltfaktoren. Ähnlich wie Glücksspielautomaten erst dann Münzen auswerfen, wenn alle angezeigten Symbole übereinstimmen, flammt das atopische Ekzem nur auf, wenn mehrere Faktoren wie erbliche Disposition, Allergene und geringe Luftfeuchtigkeit zusammenkommen. Deshalb sollten bei seiner Erforschung, Vorbeugung und Behandlung die Allergieauslöser nicht zu sehr im Vordergrund stehen.

Ein behandelbares Leiden

Eine wirksame Prävention scheint in der Tat möglich. Die frühen Lebensphasen vor und kurz nach der Geburt sind immunologisch gesehen ein kritischer Zeitraum. In ihm gilt es, die Toleranz gegenüber Allergenen zu fördern – etwa durch Optimierung der Darmflora mit Probiotika oder durch kontrollierten Allergenkontakt statt seiner strikten Vermeidung. Möglicherweise könnten auch Feuchtigkeitskremes, welche die Barrierefunktion der Haut unterstützen, ab der Neugeborenenphase helfen, allergische Erkrankungen und ihr Fortschreiten bei entsprechend veranlagten Kindern zu verhindern, zu verzögern oder abzumildern.

Die Therapie des atopischen Ekzems selbst bleibt schwierig. Zwar handelt es sich nicht um eine bedrohliche Erkrankung, doch zu sehen, wie sich ein betroffenes Kind die Haut blutig kratzt, ist herzzerreißend – und sein andauerndes Geschrei raubt der gesamten Familie den Schlaf. Häufig ist die Lebensqualität von Ekzempatienten schlechter und die Behandlung teurer als bei Kindern mit anderen chronischen Erkrankungen wie etwa dem jugendlichen Diabetes mellitus. Weitere Komplikationen entstehen bei Infektionen betroffener Hautareale mit *Staphylococcus aureus* oder *Herpes-simplex*-Viren. Außerdem entwickeln Patienten mit atopischem Ekzem, wie erwähnt, mit der Zeit oft auch Asthma, Heuschnupfen und Nahrungsmittelallergien.

Das größte Problem besteht jedoch darin, dass die Erkrankung oft unzureichend behandelt wird – nicht etwa, weil es keine wirksamen Therapien gäbe, sondern weil die Eltern nichts davon wissen oder falsche Vorstellungen davon haben. Vielfach herrscht eine übertriebene Angst vor Nebenwirkungen der lokal angewandten Kortikoide. Solche Befürchtungen stammen aus den 1960er Jahren, als die Mittel noch zu hoch dosiert wurden. So wie der Asthmatiker Kortikoidpräparate inhaliert, um die entzündlichen Reaktionen der Bronchialschleimhaut zu dämpfen, sind steroidhaltige Kremes ein probates Mittel gegen die Entzündung der Haut.

Meist genügt es, lokal ein hochwirksames Kortikoidpräparat in Kombination mit Feuchtigkeitskremes aufzutragen, damit die Entzündung abklingt. In der Regel muss das zwei bis drei Wochen lang täglich geschehen, danach nur noch einmal in der Woche. Kremes und Salben mit den alternativen Immunmodulatoren Pimecrolimus oder Tacrolimus eignen sich besonders zur Behandlung empfindlicher Hautpartien, etwa im Gesicht.

Um bei Patienten mit schweren Ekzemen die Symptome zu lindern und das Fortschreiten der Erkrankung zu unterbinden, kann auch eine systemische Therapie nötig sein, also die Behandlung mit Arzneimitteln, die eingenommen oder gespritzt werden. Hier wären neue, zielgenauer wirkende Substanzen wertvoll, die weniger Nebenwirkungen aufweisen als die bisherigen Medikamente.

DER AUTOR

Hywel Williams ist Leiter des Centre of Evidence-Based Dermatology an den Nottingham University Hospitals (Großbritannien) und Mitglied der Steuerungskommission der International Study of Asthma and Allergies in Childhood (ISAAC).

QUELLEN

Langan, S. et al.: What Causes Flares of Eczema in Children? In: British Journal of Dermatology 161, S. 640–646, 2009

Nankervis, H. et al.: Mapping Randomized Controlled Trials of Treatments for Eczema – The GREAT Database. In: BMC Dermatology 11, Artikel Nr. 10, Mai 2011

Odhiambo, J. et al.: Global Variations in Prevalence of Eczema Symptoms in Children from ISAAC Phase Three. In: Journal of Allergy and Clinical Immunology 124, S. 1251–1258, 2009

Williams, H. C.: Atopic Dermatitis. In: New England Journal of Medicine 352, S. 2314–2324, 2005

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1168625**

© Nature Publishing Group
www.nature.com
Nature 479, S. S16

Biologie des Blackouts

Hirnregionen, die der Selbstkontrolle dienen, reagieren auf Stress mitunter hochempfindlich. Wenn sie ausfallen, bricht impulsives Verhalten durch, und Denkblockaden setzen ein.

Von Amy Arnsten, Rajita Sinha und Carolyn Mazure

DAN SAELINGER

In psychisch stark belastenden Situationen kann es vorkommen, dass der präfrontale Kortex versagt – ein Areal im Gehirn, das Impulse und Gefühle steuert. Dann bricht unsere Selbstbeherrschung zusammen, und wir verlieren die Kontrolle.

Wer sich an amerikanischen Graduiertenschulen um einen Studienplatz für Medizin bewirbt, hat eine große Hürde vor sich. Er muss den Aufnahmetest bestehen: ein fünfstündiges Bombardement mit hunderten Fragen, die auch gut vorbereitete Bewerber verwirren und entnerven. Der enorme Prüfungsdruck führt bei einigen Teilnehmern dazu, dass ihre Denkfähigkeit nachlässt oder vorübergehend sogar ganz aussetzt. Es kommt bei ihnen zu einer geistigen Blockade, einem »Blackout«, »Filmriss« oder »Totalaussetzer«.

Diesen Zustand kennen freilich nicht nur angehende Medizinstudenten. Wir alle haben ihn wohl schon einmal erlebt. Er ereilt uns etwa, wenn wir eine Rede vor großem Publikum vermasseln, mit einer Schreibblockade kämpfen oder im Bewerbungsgespräch eine Frage partout nicht verstehen. Ganz zu schweigen von extremen Stresssituationen, etwa wenn Infanteristen an vorderster Front in ein Feuergefecht verwickelt werden. Lange Zeit galt als weit gehend geklärt, was dabei im Kopf vor sich geht. In den zurückliegenden Jahren haben Forscher jedoch viele neue Erkenntnisse über die physiologischen Folgen von Stressbelastungen gewonnen. Demnach kann psychischer Druck die Hirnzentren, die in Primaten am weitesten entwickelt sind, völlig lahmlegen – und damit auch die dort sitzenden geistigen Fähigkeiten.

Der etablierten Lehrmeinung zufolge reagiert vor allem der Hypothalamus, eine evolutionär alte Region im Zwischenhirn, auf Stress. In stark belastenden Situationen, heißt es, veranlasse er die Hypophyse (eine Hormondrüse im Kopf) und die Nebennieren dazu, Hormone auszuschütten. Diese Signalstoffe erhöhten dann die Herzfrequenz, steigerten den Blutdruck und verminderten den Appetit.

Doch das ist offenkundig nicht die ganze Wahrheit. Jüngere Arbeiten haben gezeigt, dass auch der präfrontale Kortex eine wichtige Rolle in der Stressreaktion spielt. Dieses Areal an der Stirnseite der Großhirnrinde vermittelt unsere am höchsten entwickelten kognitiven Fähigkeiten, darunter die zur Konzentration, Planung, Analyse und Entscheidungsfindung sowie das Urteilsvermögen und den Zugriff auf Gedächtnisinhalte. Der präfrontale Kortex hat sich während der Evolution vergleichsweise spät zu seiner jetzigen Form entwickelt. Er reagiert äußerst empfindlich auf Störungen, sogar auf alltägliche, vorübergehende Ängste und Sorgen.

Unter normalen Bedingungen arbeitet dieses Hirnareal als Steuerzentrum, das unsere Emotionen und Impulse unter Kontrolle hält. Akuter Stress hingegen löst verschiedene biochemische Signale aus, die seinen Einfluss so weit schwächen können, dass evolutionär ältere Hirnregionen die Oberhand gewinnen. Im Wesentlichen verlagert sich dabei die übergeordnete Gedanken- und Gefühlskontrolle weg vom präfrontalen Kortex hin zum Hypothalamus und anderen »archaischen« Hirnstrukturen. Sobald diese älteren Areale dominieren, können wir lähmende Angst spüren oder auch Impulsen erliegen, die wir normalerweise im Zaum halten. Die Folge sind etwa hemmungsloses Essen oder Trinken, exzessiver Drogenkonsum oder zügelloses Einkaufen.

Wenn die Sicherungen durchbrennen

Die Erkenntnis, dass akuter psychischer Druck die Funktion der höheren Kontrollsysteme im menschlichen Gehirn massiv beeinträchtigen kann, hat zahlreiche Forschungsarbeiten angestoßen. Das Ziel lautet, herauszufinden, was genau dabei im Kopf vor sich geht. Daraus entwickeln die Wissenschaftler neue verhaltenstherapeutische und medikamentöse Behandlungsansätze, die die Selbstbeherrschung verbessern sollen.

Schon nach dem Zweiten Weltkrieg versuchten Forscher zu ergründen, warum gut ausgebildete Piloten, die bei Kampfübungen zu Höchstleistungen fähig waren, im Eifer des Gefechts plötzlich an simplen Aufgaben scheiterten und verhängnisvolle Fehler machten. Was dabei im Stirnhirn passiert, konnten jedoch erst moderne bildgebende Verfahren offenlegen. Die funktionelle Kernspintomografie erlaubt einen Einblick in die Aktivitäten der vorderen Großhirnrinde – und zeigt, wie leicht sie zu irritieren ist.

Der präfrontale Kortex hat eine besondere Stellung innerhalb des Denkorgans inne. Er macht beim Menschen ein Drittel der gesamten Hirnrinde aus, mehr als bei anderen Primaten. Er reift langsamer als alle anderen Hirnregionen und ist erst nach der zweiten Lebensdekade voll entwickelt. Zudem enthält er die neuronalen Netzwerke für abstraktes Denken, ist Sitz des Arbeitsgedächtnisses und ermöglicht es, dass wir uns konzentrieren und an einer Aufgabe dranbleiben. Als mentale Kontrollinstanz hemmt er konfliktträchtige Gedanken und Handlungen.

Ein weit verzweigtes Netzwerk von vielfach verknüpften Neuronen, so genannten Pyramidenzellen, übt die Funktionen des präfrontalen Kortex aus. Sie weisen nicht nur untereinander Verbindungen auf, sondern auch zu entfernteren Hirnarealen, die unsere Emotionen, Begierden und Routinen kontrollieren. Sofern dieses Netzwerk nicht gestört wird, sorgt es dafür, dass wir unseren Alltag erfolgreich bewältigen. Das Arbeitsgedächtnis erinnert uns zum Beispiel daran,

AUF EINEN BLICK

NEURONALER AUSNAHMEZUSTAND

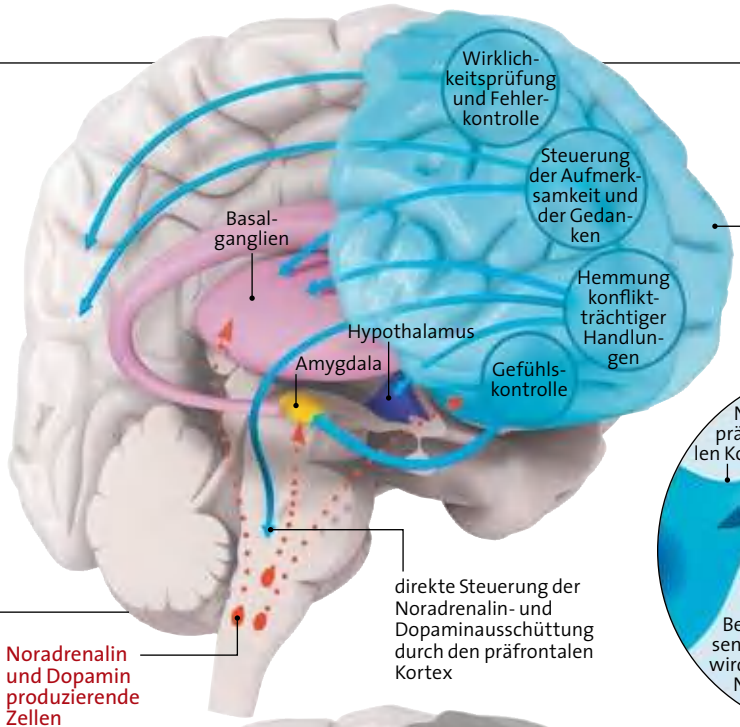
1 In Stresssituationen kann eine wichtige Steuerzentrale unseres Gehirns, der **präfrontale Kortex**, ausfallen. Dies führt zu **Denkblockaden** und **Verhaltensstörungen**. Der Zustand geht in der Regel vorüber, kann sich bei Dauerstress aber regelrecht einbrennen.

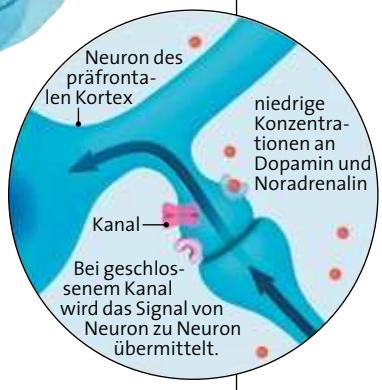
2 Normalerweise hält der präfrontale Kortex unsere Emotionen unter Kontrolle, indem er dämpfende Signale an »archaische« Hirnregionen sendet. Wenn er in stark belastenden Situationen seine Arbeit einstellt, gewinnt die **Amygdala** – eine Hirnregion, die Angstreaktionen steuert – die Oberhand, und es kommt zu **Panik** und **verminderter Selbstbeherrschung**.

3 Forscher untersuchen die Mechanismen der Stressantwort und entwickeln **verhaltenstechnische** und **medikamentöse Behandlungsansätze**, die dabei helfen sollen, unter starkem Druck nicht die Kontrolle zu verlieren.

Das gestresste Hirn

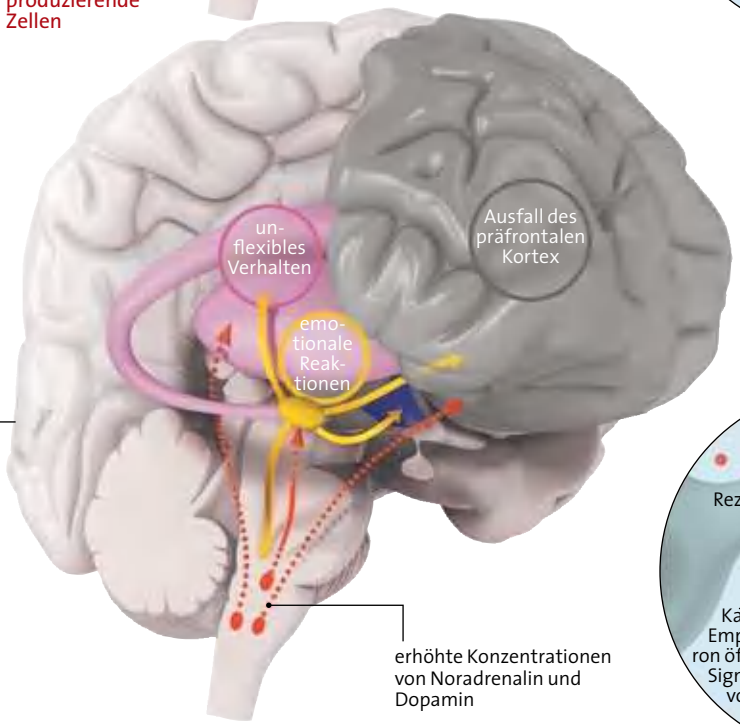
Wie kommt es zum Kontrollverlust?
Der präfrontale Kortex ist eine Region in der vorderen Großhirnrinde, unmittelbar hinter der Stirn gelegen. Er ist das zentrale Steuerzentrum des Gehirns und dafür zuständig, Impulse unter Kontrolle zu halten. Allerdings erweist er sich als recht störanfällig: Selbst alltägliche Stressbelastungen können seine Funktion weit gehend außer Kraft setzen, so dass bei den Betroffenen emotionales und impulsives Verhalten durchbricht.

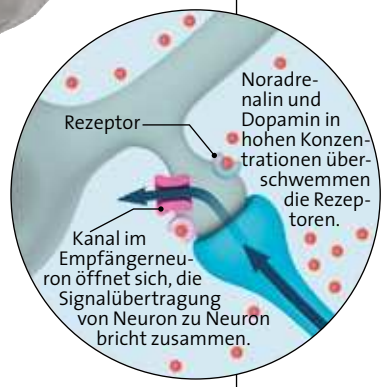




Entspannt

Der präfrontale Kortex schickt Signale in tief liegende Hirnareale wie die Basalganglien, den Hypothalamus und die Amygdala. Damit reguliert er Gewohnheitsverhalten, grundlegende Begierden wie Hunger und Geschlechtstrieb sowie emotionale Reaktionen wie Furcht. Zudem steuert er die Stressreaktionen im Hirnstamm und kontrolliert die Aktivität von Neuronen, die die Botenstoffe Noradrenalin und Dopamin ausschütten. In niedrigen Konzentrationen beeinträchtigen diese Stoffe die Signalübertragung im präfrontalen Kortex nicht.





Unter Stress

Das »Angstzentrum«, die Amygdala, löst unter starker Stressbelastung eine überschießende Produktion von Noradrenalin und Dopamin im Hirnstamm aus. Die erhöhte Konzentration dieser Neurotransmitter hemmt die Arbeit des präfrontalen Kortex. Unmengen von Noradrenalin- und Dopaminmolekülen binden dort an Rezeptoren auf den Nervenzellen, worauf sich Kanäle in den Zellmembranen öffnen und die Signalübertragung zwischen den Neuronen beeinträchtigt wird.

AXS BIOMEDICALANIMATION STUDIO, NACH: ARNSTEN, A.F.T.: STRESS SIGNALLING PATHWAYS THAT IMPAIR PREFRONTAL CORTEX STRUCTURE AND FUNCTION. IN: NATURE REVIEWS NEUROSCIENCE 10, S. 410–422, 2009

endlich mit dem Vorbereiten der Präsentation anzufangen, die nächste Woche fällig wird, derweil andere »Schaltkreise« zu verstehen geben, dass es jetzt wohl besser wäre, kein zweites Glas Wein zu trinken. Weitere Signale gehen an die Amygdala – eine tief im Gehirn gelegene Struktur, die Angstreaktionen kontrolliert – und teilen ihr mit, dass der hünenhafte Mensch, der uns auf dem Bürgersteig entgegenkommt, uns wohl nicht ins Gesicht schlagen wird.

In stark belastenden Situationen jedoch verändert sich das neurochemische Milieu in der vorderen Großhirnrinde, was die Verbindungen der dortigen Neuronennetzwerke abrupt schwächen kann. Die Stressreaktion führt dazu, dass Neurone im Stammhirn, deren Ausläufer sich durch das gesamte Denkorgan ziehen, große Mengen von erregenden Neurotransmittern ausschütten – darunter Noradrenalin und Dopamin. Diese Botenstoffe hindern die Nervenzellen im präfrontalen Kortex am Feuern, unter anderem, indem sie deren Kontaktstellen, die Synapsen, zeitweilig »kurzschließen« (siehe Grafik oben). Der betroffene Mensch ist dann nur noch eingeschränkt in der Lage, sein Verhalten zu kontrol-

lieren. Verstärkt wird dieser Effekt noch, wenn die Nebennieren auf Signale vom Hypothalamus hin das Stresshormon Cortisol ausschütten, das anschließend über den Blutstrom ins Gehirn gelangt.

Eine von uns (Arnsten) arbeitete schon 1998 an Tierversuchen mit, bei denen sich erstmals zeigte, wie schnell neurochemische Veränderungen unter Stress zum funktionellen Versagen der vorderen Großhirnrinde führen. Seither wurde vielfach belegt, dass die Nervenzellen im präfrontalen Kortex kaum noch feuern und nur sehr eingeschränkt miteinander kommunizieren, wenn sie erregenden Neurotransmittern oder Stresshormonen in hoher Konzentration ausgesetzt werden. In dieser Situation gewinnen tief gelegene Hirnareale einen stärkeren Einfluss auf unser Verhalten. Zu ihnen gehören die Basalganglien, die Begierden steuern sowie emotionale und motorische Reaktionen regeln. Sie bestimmen etwa das Geschehen, wenn wir beim Radfahren das Gleichgewicht halten oder wenn wir suchtähnlichem Verlangen nachgeben.

Auch die Amygdala, eine andere evolutionär alte Hirnregion, tritt bei Stressbelastungen in Aktion. In Anwesenheit von Noradrenalin, Cortisol und Dopamin alarmiert sie das übrige Nervensystem, sich auf Gefahren einzustellen, und verstärkt Gedächtnisinhalte, die mit Angst und anderen Emotionen verbunden sind. Das haben Benno Roozendaal, heute an der Universität Groningen in den Niederlanden, James McGaugh von der University of California in Irvine (USA) und ihre Kollegen 2001 beobachtet.

Derzeit beginnen Forscher damit, zu überprüfen, ob sich die Erkenntnisse aus den Tierversuchen auf Menschen übertragen lassen. Erste Daten zeigen, dass manche Personen empfindlicher auf Stressbelastungen reagieren als andere – entweder weil sie andere genetische Voraussetzungen mitbringen oder weil sie von früheren Erlebnissen geprägt sind. Normalerweise bauen Enzyme die Botenstoffe Dopamin und Noradrenalin rasch ab, nachdem diese den präfrontalen Kortex inaktiviert haben, weshalb wir unsere höheren kognitiven Fähigkeiten recht bald wiedererlangen. So können wir zur Tagesordnung zurückkehren, sobald der Stress nachlässt. Bestimmte Varianten im Erbgut bewirken jedoch, dass diese Enzyme nur eingeschränkt arbeiten, was die Stressanfälligkeit erhöht und in einigen Fällen zu psychiatrischen Erkrankungen führt. Auch Bleivergiftungen können teilweise zu den gleichen Symptomen führen wie die Stressreaktion und so die kognitive Leistungsfähigkeit beeinträchtigen.

Einige Wissenschaftler untersuchen, was geschieht, wenn außergewöhnliche Belastungen über Tage oder Wochen hinweg anhalten. Offenbar verstärken sich dann die Nervenverbindungen in evolutionär älteren Hirnregionen, die Emotionen und Triebe verarbeiten. Areale, die für komplexe Denkprozesse benötigt werden, beginnen dagegen zu schrumpfen. So wachsen unter chronischem Stress die verzweigten, signalempfangenden Dendriten in der Amygdala, während jene im präfrontalen Kortex verkümmern. Sobald die Dauerbelastung abklingt, können die Zellausläufer in der vorderen Großhirnrinde zwar wieder nachwachsen, wie Forscher um John Morrison von der Mount Sinai School of Medicine (New York) feststellten. Ist der Dauerstress jedoch zu extrem, verlieren die Dendriten diese Fähigkeit. Eine Vertreterin des Autorentrios (Sinha) hat Belege dafür an Menschen gefunden: Die graue Substanz im präfrontalen Kortex war umso stärker geschrumpft, je ausgeprägter die vorangegangenen Stressbelastungen gewesen waren.

Empfindlicher durch Östrogen?

Diese Mechanismen begünstigen wahrscheinlich die Entstehung von Depressionen, Suchtverhalten, Angststörungen und Posttraumatischen Belastungsstörungen. Eine wichtige Rolle dabei scheint das Geschlecht zu spielen, denn bei Frauen steigert das Hormon Östrogen offenbar die Stressanfälligkeit. Wie Mitautorin Carolyn Mazure mit ihrem Team zeigen konnte, erhöhen Stressbelastungen im Alltag das Depressionsrisiko bei Frauen stärker als bei Männern – und sie führen bei ihnen auch öfter zu potenziell suchterzeugenden Verhaltensweisen, etwa zum Rauchen.

Weitere Studien müssen detaillierter klären, wie Stress die Selbstkontrollfunktion des präfrontalen Kortex beeinträchtigt. Einige Forscher untersuchen zurzeit, welche Neurotransmitter neben den bereits bekannten die vordere Großhirnrinde noch beeinflussen. Trevor Robbins und Angela Roberts von der University of Cambridge gehen etwa der Frage nach, ob Serotonin, das eine wichtige Rolle bei Depressionen spielt,

MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de

Unser Online-Dossier »Hirnforschung« finden Sie unter

www.spektrum.de/gehirn

Stress- und Angstreaktionen über seine Wirkungen im präfrontalen Kortex beeinflusst.

Solche Studien an Menschen durchzuführen, ist allerdings schwierig, denn die heutigen ethischen Standards verbieten es, Probanden einer extremen psychischen Belastung auszusetzen. Die Teilnehmer müssen den Versuch jederzeit abbrechen können und haben die Situation damit in einem Ausmaß unter Kontrolle, wie es bei echten Stresssituationen nicht gegeben ist. Verschiedenen Arbeitsgruppen ist es trotzdem gelungen, die Effekte von unkontrollierbarem Stress nachzuahmen, indem sie den Teilnehmern verstörende Filme zeigten oder – wie Sinha und ihr Team – die Probanden aufforderten, sich eigene belastende Erlebnisse zu vergegenwärtigen.

Doch warum ist das Gehirn überhaupt mit Mechanismen ausgestattet, die seine am höchsten entwickelten kognitiven Funktionen schwächen? Möglicherweise, weil das Auslösen primitiver Reaktionen einst Menschenleben rettete. Wenn wir im Wald unvermittelt einen umherstreifenden Bären bemerken, ist es für unser Überleben weit sinnvoller, unter Schock stehen zu bleiben, so dass das Tier uns möglichst nicht wahrnimmt, als uns an die Dramaturgie des Films »Bärenbrüder« zu erinnern.

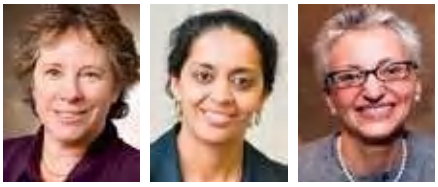
Ohne den Einfluss der relativ langsamen Kontrollinstanz im vorderen Großhirn können die evolutionär alten, vergleichsweise primitiven neuronalen Netzwerke im Gehirn uns auf der Stelle erstarren lassen oder zur sofortigen Flucht antreiben. Diese Mechanismen nutzen uns auch in der heutigen Umwelt, etwa wenn ein rücksichtsloser Autofahrer uns die Vorfahrt nimmt und wir ohne nachzudenken auf die Bremse treten. Hält der Alarmzustand im Gehirn jedoch dauerhaft an, lässt die Funktionsfähigkeit des präfrontalen Kortex allmählich nach – ein erhebliches Handikap, falls wir komplexe Entscheidungen treffen müssen, etwa über den Zeitplan eines schwierigen Bauprojekts.

Je genauer wir die Mechanismen von Stressreaktionen verstehen, umso mehr Möglichkeiten haben wir, die Funktionen des präfrontalen Kortex auch unter außergewöhnlichen Belastungen aufrechtzuerhalten. Wenn wir die molekularen Vorgänge kennen, die das Gehirn von »rational« auf »impulsiv« umschalten, können wir stressbedingte Verhaltensfehler vielleicht effizienter vermeiden. Schon heute besteht das Training für Notfallsituationen und militärische Einsätze ganz wesentlich darin, den Hirnstrukturen, die für Automatismen zuständig sind – vor allem den Basalganglien –, instinktiv ablaufende überlebenswichtige Reaktionen beizubringen. Das Konzept des militärischen Drills entspricht den Ergebnissen von Tierversuchen, denen zufolge Jungtiere, die immer wieder gemäßigte Stressbelastungen bewältigen, im Erwachsenenalter besser mit psychischem Druck umgehen. Auch Studien an Menschen belegen, dass das erfolgreiche Überwinden von problematischen Situationen die Stresstoleranz erhöhen kann.

Zudem arbeiten viele Forscher an medikamentösen Therapien. Prazosin, ein Arzneistoff gegen hohen Blutdruck, der die Wirkung von Adrenalin und Noradrenalin hemmt, wird zurzeit darauf geprüft, ob er bei Kriegsveteranen und Zivilisten die Symptome der Posttraumatischen Belastungsstörung lindern kann. Der Stoff dämpft offenbar auch das Verlangen nach Alkohol. In einer neueren Studie haben Sherry McKee von der Yale University (Connecticut, USA) und ihre Mitarbeiter die Wirkung von Guanfacin getestet, einem anderen Arzneistoff gegen Bluthochdruck. Den Ergebnissen zufolge kann er die Stressreaktion zügeln und neuronale Verbindungen im präfrontalen Kortex stärken. Damit hilft er Rauchern, in belastenden Situationen nicht zur Zigarette zu greifen. Andere Arbeitsgruppen haben belegt, dass Verhaltenstechniken wie bewusste Entspannung, tiefes Atmen und Meditation dazu beitragen können, die Stressreaktion abzumildern.

Möglicherweise verbessert sich unsere Selbstbeherrschung bereits dadurch, dass wir wissen, wie unser Denkorgan auf Stressbelastungen reagiert. Wenn Sie etwa bei der nächsten Prüfung einen gedanklichen Aussetzer haben oder während einer wichtigen Rede einen Blackout erleben, machen Sie sich klar, dass Ihr Gehirn damit lediglich versucht, Sie vor dem Bären zu retten. Dieser Gedanke könnte Ihnen zumindest ein heilsames Schmunzeln entlocken.

DIE AUTORINNEN



Amy Arnsten (links), **Rajita Sinha** (Mitte) und **Carolyn Mazure** arbeiten an der Yale School of Medicine (New Haven, Connecticut, USA). Arnsten ist dort Professorin für Neurobiologie und erforscht die molekularen Veränderungen im präfrontalen Kortex bei Stressbelastungen und Alterungsprozessen. Sinha ist Professorin für Psychiatrie und leitet das Yale Stress Center, dessen Mitarbeiter untersuchen, wie Stress auf das Verhalten wirkt. Mazure arbeitet als Professorin für Psychiatrie und Psychologie; sie leitet das interdisziplinäre Forschungszentrum für Frauengesundheit an der Yale University.

QUELLEN

Arnsten, A.: Prefrontal Cortical Network Connections: Key Site of Vulnerability in Stress and Schizophrenia. In: International Journal of Developmental Neuroscience 29, S. 215–223, 2011

Arnsten, A.: Stress Signalling Pathways that Impair Prefrontal Cortex Structure and Function. In: Nature Reviews Neuroscience 10, S. 410–422, 2009

Beilock, S.: Choke: What the Secrets of the Brain Reveal about Getting it Right when you Have to. Simon & Schuster, New York 2010

Halpern, S.: Can't Remember what I Forgot: Your Memory, your Mind, your Future. Three Rivers Press, New York 2009

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1168626**

Eine tolle Geschenkidee für das ganze Jahr!

Die Zeitschrift für Naturwissenschaft, Forschung und Technologie.
12 Ausgaben; € 84,– (ermäßigt € 69,90)

Das Magazin für Psychologie und Hirnforschung. 10 Ausgaben; € 68,– (ermäßigt € 55,–)

Die Kompetenz in Sachen Astronomie und Weltraumforschung. 12 Ausgaben; € 85,20 (ermäßigt € 64,–)

Die neuesten Erkenntnisse aus dem Bereich der Life Sciences.
4 Ausgaben; € 29,60
(ermäßigt € 25,60)

Der aktuelle Wissensstand der NWT-Forschung.
4 Ausgaben; € 29,60
(ermäßigt € 25,60)

Deutschlands erstes wöchentliches Wissenschaftsmagazin (PDF-Format; optimiert für alle digitalen Endgeräte)
€ 39,95 (ermäßigt € 30,–)

Bestellen Sie für sich oder als Geschenk:
www.spektrum.com/weihnachten

per E-Mail:
service@spektrum.com

telefonisch:
06221 9126-743

per Fax:
06221 9126-751

Die Vorteile eines Geschenkabonnements

- Sie verschenken ein ganzes Jahr lang anspruchsvolle und topaktuelle Berichte aus der spannenden Welt der Wissenschaft.
- Auf Wunsch erhält der Beschenkte pünktlich zum Fest das erste Heft mit einer schönen Grußkarte in Ihrem Namen.
- Alle Ausgaben werden pünktlich frei Haus geliefert, keine Ausgabe wird verpasst.

Ihr Geschenk zur Wahl

1. Kalender »Himmel und Erde 2013«
2. Tasche »Allrounder« von Reisenthel
3. Audio-CD »Sternstunden des Universums«
4. Buch »Digitale Demenz«
5. DVD »Planet des Lebens«
6. Smartphonehülle »Babuschka«
7. Multifunktionsmesser No. 8 von Opinel
8. Spektrum-Notizbuch

Bücher und mehr – Zum Ver- und Selberschenken

W. Engländer, H.-H. Bergmann

DIE GROSSE KOSMOS VOGELSTIMMEN-DVD

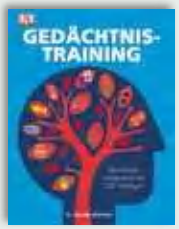
220 Vögel, Filme und Stimmen

2012, 2 DVDs, Begleitbuch, in Box, INFO-Progr. gem. § 14 JuSchG., Kosmos

Bestell-Nr. 1859

€ 49,99 (D), € 49,99 (A)

220 Vogelarten mit ihren Rufen und Gesängen erfreuen uns durch wunderschöne Bilder in Filmen, die Vögel singen dabei schnabelsynchron! Ein Sprecher erklärt jede Darstellung, das Begleitbuch informiert noch ausführlicher.



Pascale Michelon

GEDÄCHTNISTRAINING

Das Fitnessprogramm mit 200 Übungen

2012, 192 S. m. 300 Farbabb., kart., Dorling Kindersley

Bestell-Nr. 3691

€ 16,95 (D), € 17,50 (A)

In jedem Kapitel werden zunächst nützliche Informationen über das Gehirn vermittelt sowie effektive Trainingsmethoden und Strategien erläutert. Diese kann der Leser in den nachfolgenden 200 Übungen anwenden. Tests führen den Status quo und die Fortschritte vor Augen.

Storm Dunlop, Wil Tirion

DER KOSMOS STERNFÜHRER

Schritt für Schritt den Sternenhimmel entdecken

2. Aufl. 2012, 256 S. m. 51 Fotos u. 62 Farbabb. sowie 157 Sternkarten, in Kunststoffhülle, kart., Kosmos

Bestell-Nr. 3639 € 19,99 (D), € 20,60 (A)

Entdecken Sie in diesem Reiseführer die schönsten Objekte des Nachthimmels für die Beobachtung mit bloßem Auge, Fernglas und Fernrohr. Eine detaillierte Mondkarte, viele Zusatzinfos sowie ein ausführliches Glossar machen das Buch zum idealen Begleiter und Nachschlagewerk.

Dieter Willasch, Auke Slotegraaf

PERLEN DES SÜDHIMMELS

Eine Reise zu exotischen Sternhaufen, Nebeln und Galaxien

2012, 176 S. m. zahlr. farb. Fotos, 21 x 30 cm, geb., Oculum

Bestell-Nr. 3747 € 39,90 (D), € 41,10 (A)

Der großformatige Bildband im Querformat fängt die Magie des Südhimmels ein. Insgesamt 71 Deep-Sky-Objekte von der Perlenketten-Galaxie bis zum Helix-Nebel werden auf je einer Doppelseite in Bild und Text vorgestellt. Omega Centauri, Kohlensack, Tarantel-Nebel... Stimmen Sie sich ein auf den Südhimmel!

Udo Gansloßer, Kate Kitchenham

FORSCHUNG TRIFFT HUND

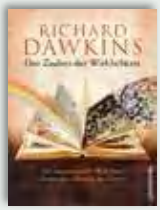
Neue Erkenntnisse zu Sozialverhalten, geistigen Leistungen und Ökologie

2012, 240 S. m. 250 Farbabb., geb., Kosmos

Bestell-Nr. 3751

€ 29,99 (D), € 30,90 (A)

Immer mehr Forschungsprojekte in Europa und den USA befassen sich mit dem Haushund, seiner Entwicklung, seinem Verhalten, seiner Intelligenz und seinen Emotionen. Dr. Udo Gansloßer und Kate Kitchenham berichten über die Forscher und ihre Arbeit, fassen die interessantesten Ergebnisse zusammen und geben damit Hundehaltern Anleitung für ein besseres Verständnis ihres Vierbeiners.



Richard Dawkins

DER ZAUBER DER WIRKLICHKEIT

Die faszinierende Wahrheit hinter den Rätseln der Natur

2012, 270 S. m. zahlr. Abb., geb., Ullstein

Bestell-Nr. 3752

€ 26,99 (D), € 27,80 (A)

Seit jeher hat die Menschheit versucht, sich die rätselhafte Natur durch Mythen begreiflich zu machen. Auf den Herbst folgt der Winter, weil Hades, Persephone in sein Reich entführt hat und die blühende Natur mit ihr; in Wirklichkeit gibt es unterschiedliche Jahreszeiten, weil die Erdachse geneigt ist. Und die Welt entstand auch nicht, weil der indische Gott Vishnu seinem Diener Brahma ihre Erschaffung auftrug, sondern durch den Urknall. So wunderbar die Mythen sind, weitaus spannender ist die wissenschaftliche Betrachtung. Genau das tut Dawkins, indem er die Wahrheit hinter den Rätseln erklärt. Ein faszinierendes, üppig illustriertes Buch, das den Zauber der Wirklichkeit feiert.

Bestellen Sie direkt: +49 6221 9126-841 @ info@science-shop.de

Alexander Unzicker

AUF DEM HOLZWEG DURCHS UNIVERSUM

Warum sich die Physik verlaufen hat

2012, 304 S. m. Abb., geb., Hanser

Bestell-Nr. 3719

€ 19,90 (D), € 20,50 (A)

Keine Disziplin treibt so seltsame Blüten wie die Physik: Spekulationen über Paralleluniversen etwa, die mit Wissenschaft nicht mehr viel zu tun haben. Gleichzeitig sind grundlegende Fragen der Physik noch immer unbeantwortet. Doch statt Lösungsansätze von Einstein oder Dirac aufzugreifen, verwendet man lieber Milliarden auf die Suche nach neuen Teilchen und mutmaßt über verborgene Dimensionen. Alexander Unzicker liest der Physik die Leviten – und weist ihr den Weg aus dem Labyrinth, in dem sie sich verlaufen hat.

Ken Taylor

KOSMISCHE KULTSTÄTTEN DER WELT

Von Stonehenge bis zu den Maya-Tempeln

2012, 240 S. m. 200 Farbabb., geb., Kosmos

Bestell-Nr. 3638 € 29,99 (D), € 30,90 (A)

Überall auf der Welt zeigen beeindruckende Bauten das himmelskundliche Wissen unserer frühen Vorfahren. In diesem reich bebilderten Buch beschreibt der Archäologe Ken Taylor ausführlich über fünfzig bedeutende Kultstätten auf der ganzen Welt.

Werner Gruber, Heinz Oberhummer, Martin Puntigam

GEDANKENLESEN DURCH SCHNECKENSTREICHELN

Was wir von Tieren über Physik lernen können

2012, 296 S., geb., Hanser

Bestell-Nr. 3648

€ 19,90 (D), € 20,50 (A)

In *Gedankenlesen durch Schneckenstreicheln* begeben sich die beiden Physiker Heinz Oberhummer und Werner Gruber sowie der preisgekrönte Satiriker Martin Puntigam auf eine Reise ins Tierreich. Dabei stoßen sie auf faszinierende wissenschaftliche Phänomene. Wissenschaft für alle: Spektakulär, lehrreich und unterhaltsam.

WUNDER DES UNIVERSUMS

BBC

2012, Laufzeit ca. 200 Min., Verlag: Polyband

Bestell-Nr. 3656

€ 14,99 (D), € 14,99 (A)

Die Dokumentation nimmt Sie mit auf eine Entdeckungsreise quer über unseren Planeten, von den verbrannten Ebenen Afrikas hin zu den schneebedeckten kanadischen Rockies. Diese Reisen quer über unseren Planeten werden mit spektakulären Bildern aus dem Weltraum kombiniert. Mittels beeindruckender Bilder aus Teleskopen und computergenerierten HD-Aufnahmen liefert *Wunder des Universums* Eindrücke von gigantischen Supernovae, Gammastrahlenexplosionen und kürzlich entdeckten Galaxien und gibt Aufschluss über die entferntesten Bereiche des Universums. Sprachen: Deutsch und Englisch; INFO-Programm gem. §14 JuSchG.

Josef Honerkamp

WAS KÖNNEN WIR WISSEN?

Mit Physik bis zur Grenze verlässlicher Erkenntnis

2012, 367 S. 21 SW-Abb., geb., Spektrum Akademischer Verlag

Bestell-Nr. 3649

€ 24,95 (D), € 25,70 (A)

Was wissen Physiker über die Welt und wie sicher wissen sie es? – Den Autoren bewegten Begegnungen und Gespräche aus seinem Alltag dazu, über die faszinierendsten Fragen nachzudenken: Über Zeit, Materie, Quanten, Zufall und die Realität, bis zu kritischem Rationalismus, Emergenz, Vorwissen sowie die Physik aus der Gottesperspektive.

Kurze Erläuterung zu den Angaben hinter den Preisen: (D) ist der Preis für Deutschland, (A) der Preis für Österreich

CHRISTBÄUMCHEN: FOTOLIA / PIXI

Jörg Resag

ZEITPFAD

Die Geschichte unseres Universums und unseres Planeten

2012, 393 S. m. 177 Farbabb., geb., Spektrum Akademischer Verlag

Bestell-Nr. 3644

€ 29,95 (D), € 30,80 (A)

Das durchgängig vierfarbige und reich illustrierte Buch des Physikers Jörg Resag stellt das moderne Gesamtbild der Naturgeschichte umfassend dar und lädt den Leser zu einer Zeitreise ein, die beim Urknall beginnt und bis in die Zukunft des Universums führt.

Stuart Clark

KOSMISCHE REISE

Von der Erde bis zum Rand des Universums

2012, 240 S. m. 200 Farbabb., geb., Spektrum Akademischer Verlag

Bestell-Nr. 3645

€ 39,95 (D), € 41,10 (A)

Begeben Sie sich auf eine intergalaktische Mission, die Sie durch einen Raum von Hunderten von Trilliarden Kilometern und durch eine Zeitspanne von über 13 Milliarden Jahren führt. Mehr als 300 spektakuläre astronomische Aufnahmen und informative Texte vermitteln nachhaltige Eindrücke von den 101 Stationen dieser großartigen kosmischen Reise.

Christian Hesse

CHRISTIAN HESSES MATHEMATISCHES SAMMELSURIUM

1 : 0 = ∞

2012, 236 S. m. 40 z. Tl. farb., kart., Beck

Bestell-Nr. 3721

€ 14,– (D), € 14,40 (A)

Unentbehrlich x Unermesslich x Unverbesserlich = Hesses mathematisches Sammelsurium. Und zwar für alle: vom manischen Mathematiker bis zum Zahlenangsthasen. Das Buch ist eine flammende Hommage an die Mathematik nach gut dreißigjähriger Beschäftigung mit ihr aus nächster Nähe.

Alice Roberts (Hg)

DIE ANFÄNGE DER MENSCHHEIT

Vom aufrechten Gang bis zu den frühen Hochkulturen

2012, 256 S. m. über 800 farbige Abb. u. Ktn., geb., Dorling Kindersley

Bestell-Nr. 3718 **€ 29,95 (D),** € 30,80 (A)

Dieses imposante Werk dokumentiert mit mehr als 800 Abbildungen die Geschichte der menschlichen Evolution. Dabei geht es nicht nur um die biologische, sondern auch um die kulturelle Entwicklung bis zu den frühen Hochkulturen. Mit beeindruckende Schädelrekonstruktionen von den niederländischen Präparatoren und Künstlern Adrie und Alfons Kennis.

Anthony Kenny

GESCHICHTE DER ABENDLÄNDISCHEN PHILOSOPHIE, 4 BÄNDE

Antike – Mittelalter – Neuzeit – Moderne

2012, 1408 S. m. zahlr. SW-Abb., geb., Primus

Bestell-Nr. 3654

Einführungspreis € 99,90 (D), € 102,70 (A)

gültig bis 01.02.2013, danach kostet das Werk € 149,–

Die 4 Bände sind zum Preis von je € 49,90 auch einzeln erhältlich. Sparen Sie mit der günstigen Gesamtausgabe!

Diese Philosophiegeschichte setzt neue Maßstäbe! Dem britischen Philosophen Anthony Kenny ist etwas gelungen, wonach man im deutschen Sprachraum vergeblich sucht: eine ohne Vorkenntnisse verständliche, ja sogar unterhaltsam geschriebene Philosophiegeschichte von den Anfängen bis zur Gegenwart. In seinem vierbändigen Werk erzählt Kenny die Philosophiegeschichte. Dabei verbindet er gekonnt die Darstellung der Ereignisgeschichte und einzelner Denker mit einer Erläuterungen der Problemgeschichte und philosophischen Argumentation.

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich

Jürgen Beetz

1+1=10: MATHEMATIK FÜR HÖHLENMENSCHEN

2012, X, 340 S. m. 100 Abb., kart., Spektrum

Bestell-Nr. 3731

€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Mehr als die einfache Logik eines Frühmenschen brauchen Sie nicht, um die Grundzüge der Mathematik zu verstehen. Denn Sie treffen in diesem Buch viele einfache, fast gefühlsmäßig zu erfassende mathematische Prinzipien des täglichen Lebens. Eine umfassende Übersicht über die »gesamte« Mathematik (definiert durch Abitur- bzw. Erstsemester-Level).

Alain Lieury

EIN GEDÄCHTNIS WIE EIN ELEFANT?

Tipps und Tricks gegen das Vergessen

2012, 320 S. m. 57 SW-Abb., kart., Spektrum

Bestell-Nr. 3727

€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Humorvoll geschrieben und bestückt mit zahlreichen Beispielen bietet dieses heitere und zugleich lehrreiche Werk einen Überblick über die unterschiedlichen Bereiche der Gedächtnisforschung und Methoden zur Steigerung der Gedächtnisleistung.

Besuchen Sie uns im Internet unter:
www.science-shop.de

Wolfgang W. Osterhage

STUDIUM GENERALE PHYSIK

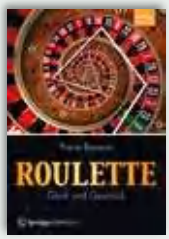
Ein Rundflug von der klassischen bis zur modernen Physik

2012, 288 S. m. 80 SW-Abb., 7 Tabellen., geb., Spektrum

Bestell-Nr. 3749

€ 24,95 (D), € 25,70 (A)

Dieses Buch nähert sich den großen Komplexen der Physik, ohne Spezialistenwissen vermitteln zu wollen. Dabei werden zunächst die Grundlagen der klassischen Physik erörtert: Mechanik, Elektrizitätslehre, Felder, Wellen und Wärmelehre. Auf dieser Basis werden dann die wesentlichen Erkenntnisse der Quantenphysik (Atomphysik, Kernphysik) einerseits und der Kosmologie (Relativitätstheorie) andererseits bis zum aktuellen Wissensstand entwickelt; ein Buch, geschrieben für alle, die in die Physik einsteigen oder sich (nochmal) einen Überblick verschaffen wollen – mit vielen weiterführenden Literaturhinweisen und Gedanken zum Weiterdenken.



Pierre Basieux

ROULETTE – GLÜCK UND GESCHICK

2012, 450 S. m. 143 SW-Abb., geb., Spektrum

Bestell-Nr. 3743

€ 69,95 (D), € 72,– (A)

Pierre Basieux, promovierter Mathematiker, hat die wissenschaftliche und praktische Erforschung dieses Spiels nicht nur einige Jahrzehnte als Hobby betrieben, sondern es auch revolutioniert. Über das bereits Bekannte hinaus enthält sein Buch vor allem a) entscheidende Ergänzungen, die bisher in Buchform absichtlich nicht preisgegeben wurden, b) neue praktische Aspekte, vor allem in den Bereichen Wurfweitenspiel und Kesselgucken, und c) wesentliche Vereinfachungen, die sich aus diesen neuen praktischen Erkenntnissen ergeben.

Gustave-Nicolas Fischer, Virginie Dodeler

WIE GEDANKEN UNSER WOHLBEFINDEN BEEINFLUSSEN

Auswirkungen der Psyche auf die Gesundheit

2012, 288 S. m. 51 SW-Abb., kart., Spektrum

Bestell-Nr. 3726

€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Was heißt eigentlich »gesund sein«? Wenn es der Seele gut geht, so hat dies auch positive Auswirkungen auf das körperliche Wohlbefinden. Gustave-Nicolas Fischer und Virginie Dodeler stellen die wichtigsten 100 Aha-Experimente auf diesem Gebiet kurzweilig und anschaulich dar. Durch die daraus resultierenden erstaunlichen Entdeckungen wird jeder Leser den Einfluss der Psyche auf die Gesundheit noch besser verstehen. Dazu gibt es praktische Lösungsansätze zur Begleitung auf dem Weg zum physischen Wohlbefinden.

LERNPAKET EXPERIMENTE MIT DEM STIRLINGMOTOR

2012, Stirlingmotor, Generator, Steckbrett, 20 Bauteile und Handbuch, Franzis

Bestell-Nr. 3526 € 149,90

Dieses Franzis-Lernpaket enthält ein voll funktionsfähiges Stirlingmotor-Modell, einen elektrischen Generator, ein Experimentiersteckbrett und viele weitere Elektronikbauteile. Damit können Sie Funktionsweise und Einsatzmöglichkeiten des Stirlingmotors praktisch erfahren und erforschen. Das Modell ist komplett vormontiert und kann nach dem Zusammenbau des Brenners sofort in Betrieb genommen werden. Dazu brauchen Sie nichts weiter als handelsüblichen Brennspiritus (nicht enthalten). Das Handbuch führt vom einfachen Bauteil zum fertigen Projekt. Die physikalischen Grundlagen und die unterschiedlichen Typen der Stirlingtechnik werden genau erklärt.

FLEDERMAUSDETEKTOR ZUM SELBERBAUEN

Inhalt: Buch und alle Bauteile, zusätzlich benötigt werden: Lötkolben für den Aufbau, 9-V-Batterie (nicht enthalten), Franzis

Bestell-Nr. 1929 € 29,95

Belauschen Sie die Natur mit moderner Elektronik! Die Platine des Bausatzes ist bereits mit zahlreichen SMD-Bauelementen bestückt. Sie müssen nur noch wenige Teile selbst einlöten und die Platine mit Mikrofon, Lautsprecher und den Einstellreglern verdrahten. Moderne integrierte Schaltungen sorgen für hohe Empfindlichkeit und Lautstärke. Mit dem fertigen Detektor lassen sich die Ultraschall-Rufe von Fledermäusen hörbar machen. So können Sie diese faszinierenden Flugkünstler in der Dunkelheit auch dort aufspüren, wo sie sonst völlig unbemerkt auf der Jagd nach Insekten sind.

STIRLING-AUTO A1 FERTIGMODELL

Schrauben aus Edelstahl, Seitenteile aus poliertem Edelstahl, Räder aus Vollmessing mit rundem Gummi-belag, Gabel und Kühlergrill aus Aluminium, Maße: 13 x 16 x 8,7 cm, Gewicht: 1.200 Gramm, Böhm

Bestell-Nr. 3475 € 398,– (D), € 398,– (A)

Robert Stirling, der Erfinder des Stirlingmotors, und Carl Benz haben eines gemein: Sie erhielten Patente für außergewöhnlich revolutionäre Technik. Im Stirling-Auto A1 wurden die Ideen dieser beiden Entwickler zusammengeführt. Die feinen Messingspitzen erinnern an die Pickelhauben aus der Kaiserzeit und an die historischen Automobile aus der Zeit um 1885.
Weitere Infos: www.science-shop.de/artikel/1130551
Hier können Sie auch einen Film über das Auto sehen.

DAMPFMASCHINE »MINI BEAM« – FERTIGMODELL

Länge: 106 mm, Breite: 49 mm, Höhe: 73 mm (über Schornstein), Kolbendurchmesser: 7 mm, Hub: 7 mm, Steuerung: Schiebersteuerung, doppelseitig wirkend, Gewicht: 96 g, Laufzeit: ca. 5 Min. mit einer Wasserfüllung, Hielscher

Bestell-Nr. 3535 € 149,50

Die ersten funktionsfähigen Dampfmaschinen, die um 1750 zum industriellen Einsatz kamen, waren Beam=Balken=Balance, alles Maschinen mit einem auf einer Mittelsäule liegenden Balken: sowohl die atmosphärische Dampfmaschine von Thomas Newcomen von 1712 als auch die Niederdruckmaschine von James Watt um 1769. Unser Modell, die kleinste, doppelseitig wirkende Beam-Dampfmaschine, wurde von Lutz Hielscher entwickelt. Mit Abdampfkondensator und aus Edelstahl, Messing und Aluminium.

Ebenfalls lieferbar als Bausatz:

DAMPFMASCHINE »MINI BEAM« – BAUSATZ

Bestell-Nr. 3536 € 136,50

PIEPEI GOLD

Das perfekte Frühstücksei für jeden Feinschmecker

Mit echtem Gold veredelt, Brainstream

Bestell-Nr. 2700
€ 24,90

Einfacher und präziser können Frühstückseier nicht gekocht werden. Das PiepEi misst die Wassertemperatur und berechnet daraus über eine Differenzialgleichung die Innentemperatur im Ei. Erreicht die Temperatur im Eigelb 62 °C, so erklingt eine Melodie. Man kann den Kochvorgang auch mit kaltem Wasser starten.

Bestellen Sie direkt: +49 6221 9126-841 @ info@science-shop.de

POWERLUX – LEUCHTLUPE KALTWEISS

Linsengröße: Ø 58 mm, cera-tec®, Vergrößerung: 28 dpt / 7x (Doppellinse), punktgenaue Ausleuchtung, Abschaltautomatik nach 30 Min., Lichtfarbe: kaltweiß, ca. 8000 K, Hartschaumetui. Benötigt werden 3 Mignon Batterien, im Lieferumfang enthalten, made in Germany, Eschenbach

Bestell-Nr. 3476 € 99,– (D), € 99,– (A)

Die neue Generation der Leuchtlupe – in einer neuen geometrischen Gestaltung. Die einzigartige und vertraute Form der Computermaus hat sich millionenfach bewährt und sorgt für eine entspannte Handhaltung auch bei längerem Gebrauch.

- liegt sehr gut in der Hand
- sehr einfache, intuitive Führung auf dem Lesegut durch kompakte Bauform
- gleichmäßig helle und blendfreie Ausleuchtung durch zwei SMD-LED

CAZORLA 8 x 56 PREMIUM

Fernglas mit Tragetasche aus Nylon

Achtfache Vergrößerung, Öffnung: 56 mm, hohe Vergütung, Gewicht: 1150 g, Pentaflex

Bestell-Nr. 3665 € 189,–

Ein hochwertiges Allround-Fernglas für alle Naturfreunde: Für die Astronomie bis zur Tier- und Landschaftsbeobachtung geeignet. Dank rutschfester Gummiarmierung liegt es gut in der Hand und ist hervorragend gegen Feuchtigkeit geschützt.

MENDOCINO-MOTOR, FERTIGMODELL

Im Magnetfeld frei schwebender Solarmotor

Rotor aus Acrylglas, Bodenplatte aus Echtglas, Maße: 20 x 10 x 10 cm, Carl Aero

Bestell-Nr. 3652 € 159,–

Dieser Solar-Elektromotor ist eine Konstruktion, die schon auf den ersten Blick Aufmerksamkeit erregt. Oft wird erstaunt gefragt, wie sich ein solcher frei schwebender Körper überhaupt in Bewegung versetzt.

Der Motor verfügt über eine Lagerung aus sechs Hochleistungs-Neodym-Magneten. Dadurch scheint der Anker des Motors frei im Raum zu schweben. Der Anker selbst ist mit hocheffizienten monokristallinen Solarzellen bestückt. Diese liefern nur dann Strom, wenn sie sich im Lauf der Drehbewegung jeweils auf der Oberseite befinden. Die Kommutation dieses Motors findet auf optischem Weg statt.

Ein Video zum *Mendocino-Motor* finden Sie hier:
www.science-shop.de/artikel/1156118

Ebenfalls lieferbar als Bausatz (Löten erforderlich):
Bestell-Nr. 3653 € 139,–

Die Wissensbecher aus hochwertigem Porzellan sind ein schönes und nützliches Geschenk!

Höhe: 105 mm; Inhalt: 460 ml, spülmaschinengeeignet, Könitz Porzellan

WISSENSBECHER MATHEMATIK
Bestell-Nr. 3430 € 9,95

WISSENSBECHER PHYSIK
Bestell-Nr. 3431 € 9,95

WISSENSBECHER CHEMIE
Bestell-Nr. 3432 € 9,95

Für Bestellungen außerhalb Deutschlands und Österreichs berechnen wir € 3,50 Versandkosten. Alle Preise inkl. Umsatzsteuer. Preise unter Vorbehalt. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH

LERNEN WIR VON SISYPHOS

Sandsteinobjekt

Zinkfigur von Hand gebogen, Sandsteinsockel von Hand gegossen, Größe: 11 x 20 x 3,5 cm (H x B x T), Gewicht: 620 g, invocem

Bestell-Nr. 3662 € 39,90

Aufgaben, die trotz großer Mühen so gut wie nie erledigt werden, nennt man Sisyphosarbeit. Das Objekt ist eine Erinnerung, größere Projekte in abgrenzbaren Schritten zu erledigen und diese Schritte immer wieder abzusichern. Diese Absicherung symbolisiert der in den Sockel eingelassene Keil.

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich

ALBERT-EINSTEIN-BÜSTE

aus Biskuitporzellan

Höhe: 14,5 cm, in weißer Geschenkschachtel; Kämmer

Bestell-Nr. 3651 € 24,90

Ein Schmuckstück für Regal oder Schreibtisch!

Die 14,5 cm hohe Büste wird gegossen, bei 1350 Grad gebrannt und anschließend poliert. Durch das Polieren des Biskuitporzellans erhält die Büstenoberfläche einen feinen, seidenmatten Glanz. Made in Germany!

DIE KNOTENBOX

50 Knoten-Klassiker für Freizeit, Sport und Alltag

Mit 2 Schnüren zum Üben in Metallbox, moses

Bestell-Nr. 3617 € 12,95

Der Seemann kann in jeder Lebenslage den richtigen Knoten knüpfen. Aber mit der Knotenbox lernen auch wir Landratten 50 bewährte Knoten mit Hilfe von 50 handlichen Karten und 2 Schnüren. Mit anschaulichen Schritt-für-Schritt-Abbildungen und wissenswerten Sachinformationen rund um Entstehung, Gebrauch und Anwendung der Knoten.

ZAHLEN AM LAUFENDEN METER

Albrecht Beutelspachers Mathezollstock

2012, Maße: 24 x 1,6 x 2,8 cm, Metermorphosen

Bestell-Nr. 3650 € 12,90

Der Mathe-Meterstab zeigt Wissenswertes und Überraschendes aus der Welt der Zahlen und Formeln am laufenden Meter: von Pythagoras über Archimedes und Gauß bis zu dem indischen Zahlengenie Ramanujan.

Besuchen Sie uns im Internet unter:
www.science-shop.de

IPSOL 4/4S SOLAR

Ladeschale mit eingebautem 2400-mAh-Lithium-Polyme-Akku für Iphone 4/4S

mit Micro USB-Kabel, Farbe: schwarz, Inprosolar

Bestell-Nr. 3716 € 89,–

Die Ladeschale verschmilzt mit dem iPhone zur einer Einheit. Sie ist sehr ergonomisch in der Handhabung und löst mit dem zusätzlichen Energiespeicher jedes Problem des täglichen Nachladens. Und wenn mal keine Energie in beiden Speichern vorliegt, sorgt das Solarmodul für eine vernünftige Notstromversorgung: **1 Stunde in der Sonne laden ermöglicht 1 Stunde telefonieren.**

DAS BAUMEISTERSPIEL KLASSIK

Unendliche Vielfalt

Format 12,5 x 12,5 cm, blaue Steine mit grauer Platte aus Recyclingkunststoff, Logika Spiele

Bestell-Nr. 3616 € 16,–

Acht verschieden gestaltete Bausteine, die jeder für sich aus mehreren Einzelwürfeln bestehen, werden auf einer Grundplatte zu den unterschiedlichsten Formen zusammengebaut. Mit seiner unerschöpflichen Vielfalt weckt es den Spielspaß und schult so spielerisch Gedächtnis, Konzentration, Geduld, Intelligenz und erst recht räumliches Vorstellungsvermögen, Fantasie, Intuition, laterales Denken. Für 1 Spieler.

NACHTSICHTGERÄT NIGHT EYE 3x42

Restlicht- und IR-Licht-Verstärker, Vergrößerung: 3-fach, Ø Objektiv: 42 mm. Benötigt wird eine CR123A-Batterie (nicht im Lieferumfang enthalten), Omegon

Bestell-Nr. 3655 € 199,–

Das *Night Eye* ist ein Restlichtverstärker und funktioniert mit einem Bildwandler, der das Licht um das etwa 1000-Fache verstärkt. Ist Restlicht vorhanden, sind Beobachtungen bis zu 200 Meter Distanz möglich. Und bei absoluter Dunkelheit wird mit einem weiteren Knopfdruck der IR-Licht-Verstärker eingeschaltet. *Night Eye* ist kompakt und mit einer Hand bedienbar.

Thomas Riegler

DAS GROSSE RETRO-RADIO-BAUBUCH

2012, 32seitiges Buch und alle Bauteile für ein Mittelwellenradio im Retro-Stil, ohne Löten, Franzis

Bestell-Nr. 3757 € 29,95

Das dekorative Retro-Gehäuse lässt Ihr fertiges Radio fast wie ein original Grundig-Gerät Modell 2012 aussehen. Zusätzlich brauchen Sie nur noch eine 1,5-VBatterie Typ AA (nicht enthalten), und schon kann es losgehen! Und im Begleitbuch: Alles, was zum Bau Ihres Radios und zum Verständnis seiner Technik notwendig ist, auf 30 Seiten mit großen, farbigen Abbildungen und Grafiken.

Das Zometool Konstruktionssystem bietet die einfache Möglichkeit, fast alle geometrischen Grundkörper und ihre Beziehungen untereinander zu erforschen. Jetzt gibt es das beliebte Konstruktionssystem auch in elegantem Schwarzweiß.

ZOMETOOL DESIGN 5

227 Teile mit 8-seitiger Beschreibung, Zometool

Bestell-Nr. 3760

€ 60,–

Design 5 beschäftigt sich vor allem mit dem Rhombentriakontaeder. Sie können einen Rhombentriakontaeder mit weißen Streben und Kugeln bauen, ferner die Schattenprojektionen dieses 3-D-Modells in 2-facher, 3-facher und 5-facher Symmetrie.

ZOMETOOL DESIGN 3

120 Teile mit 8-seitiger Beschreibung, Zometool

Bestell-Nr. 3759

€ 30,–

Um die Schönheit der Symmetrien zu zeigen, beschäftigen wir uns hier mit dem Würfel. Seine hohe Symmetrie wird durch die Gleichartigkeit seiner Kanten, Ecken und Flächen bestimmt.

ACHTUNG! Nicht für Kinder unter 3 Jahren geeignet. Erstickungsgefahr wegen verschluckbarer Kleinteile.

VIDEO-HELICOPTER SAFARI RTF/ GSY/3+3CH/MHZ

Mit abnehmbarer Kamera für Foto- und Videoaufnahmen und LED-Beleuchtung

L x B x H: 365 x 85 x 175 mm, Ø Hauptrotor: max. 360 mm / 70 mm, Fluggewicht: 270 g, Laden über beiliegendes Ladegerät, Controller mit 6 x 1,5-V-AA-Batterien (nicht enthalten), Revell

Bestell-Nr. 3717 € 99,–

Ready-to-Fly-MHz-Helikopter in auffälligem Design mit abnehmbarer Kamera für Foto- und Videoaufnahmen und über die Fernsteuerung schaltbarer LED-Beleuchtung. Der Helikopter hat sehr gute Flugeigenschaften durch das elektronische Kreiselsystem (Gyro) und ist gut beherrschbar. Das Laden erfolgt über das mitgelieferte Ladegerät. Indoorgeeignet – Outdoor nur bei Windstille. Einsteigermodell, ab 15 Jahren.

PEN ULTIMATE

Bestell-Nr. 1667 € 13,90

Der schwebende Pen Ultimate ist ein Blickfang für Ihren Schreibtisch. Der Kugelschreiber schwebt in einer speziellen Halterung und kann um die Längsachse in Rotation gebracht werden.

Kalender – Schöne Begleiter durchs Jahr

STERNZEIT

Kalendarium dtsch.-engl., 13 farb. Blätter, Maxi-Format: 70 x 50 cm, Palazzi Verlag

Bestell-Nr. 1335 **€ 44,80**

Modernste Teleskope geben uns verblüffende Ausblicke und tiefe Einblicke in die Struktur und Entwicklung des Universums. Mit informativen Texten und Detail-Abbildungen.

HIMMEL UND ERDE

13 farb. Blätter, Format: 55,5 x 45,5 cm, Spiralbindung, Weingarten

Bestell-Nr. 1338 **€ 32,–**

In diesem Kalender von *Sterne und Weltraum* präsentieren Astronomen zwölf faszinierende Aufnahmen von Sternen, Planeten und dem Weltraum. Das Kalendarium bietet zusätzlich Hinweise auf wichtige Himmelsereignisse im Jahr 2013.

Bestellen Sie direkt: **+49 6221 9126-841** **info@science-shop.de**

NATURTAFELN

Mit Zweimonats-Kalendarium, 7 farb. Blätter, Format: 49,5 x 68,5 cm, DuMont

Bestell-Nr. 2878
€ 26,99

Sechs Schreiber-Tafeln zu interessanten Wissensgebieten aus Flora und Fauna mit vielen detailgetreuen Abbildungen befinden sich in diesem Kalender. Bleiben Sie ein Jahr lang der Natur auf der Spur!

WEGE

Kalendarium dreisprachig, mit Jahresübersicht, 13 farb. Blätter, Format: 48 x 54 cm, Ackermann

Bestell-Nr. 2433 **€ 29,95**

Sie wissen doch: Der Weg ist das Ziel! Wege durch interessante Landschaften in den jeweiligen Jahreszeiten – wunderschön fotografiert.

VERBORGENE WELTEN

Kalendarium mehrsprachig, 13 farb. Blätter, Format: 49,5 x 68,5 cm, DuMont

Bestell-Nr. 2176 **€ 34,99**

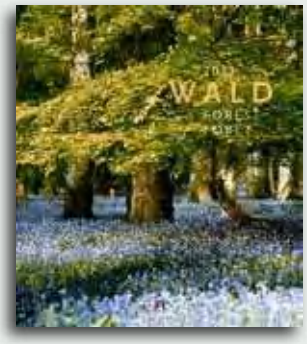
Entdecken Sie die Welt der Pflanzen, Insekten und Bakterien aus nächster Nähe. Die mehrfach ausgezeichneten Wissenschaftsfotografen Oliver Meckes und Nicole Ottawa führen Sie in die Welt des Raster-Elektronenmikroskops. Wissenschaftliche Fotografien, abgerundet durch sachkundige und informative Texte.

STARKE TYPEN – WELT DER TIERE

Text dtsch.-engl.-französ., 13 farb. Blätter, Format: 60 x 50 cm, Palazzi-Verlag

Bestell-Nr. 3362
€ 39,80

Wie viel Kraft und Lebensfreude, wie viel Charme und Witz diese Bilder vermitteln! 12 Glanzlichter der Tier-Fotografie als idealer Begleiter durch das Jahr.



WALD

14 farb. Blätter, Format: 48 x 54 cm, Ackermann

Bestell-Nr. 3674 **€ 29,95**

Ob mystischer Urwald oder herbstliche Baumkronen in voller Farbenpracht – in den Bildern dieses Kalenders offenbart sich die Vielfalt des Ökosystems Wald in seiner ganzen Pracht.

Weitere Kalender finden Sie unter:
www.science-shop.de/kalender

VOM ZAUBER ALTER BÄUME

Kalendarium dreisprachig, 13 kolorierte SW-Blätter, Format: 58,4 x 48,5 cm, DuMont

Bestell-Nr. 3361 **€ 26,99**

Zwölf verwitterte und steinalte Baumriesen präsentieren sich in ihrer ganzen Ehrwürdigkeit und Imposanz. Heinz Wohner hat sie in Deutschland aufgespürt, fotografiert, und anschließend die SW-Fotografien kunstvoll von Hand koloriert.

EULEN

Kalendarium dtsch.-engl.-französ., 13 farb. Blätter, Format: 45 x 34,5 cm, Weingarten

Bestell-Nr. 2185 **€ 19,95**

Diese scheuen Nachtvögel gehören von Anbeginn zum Kreis der Geschöpfe, die den Menschen von besonderer Bedeutung waren, ob als Symbol für Weisheit (bei den alten Griechen) oder Tod und Verderben (bei den Christen).

EINSTEIN FÜR QUANTEN-DILETTANTEN

Ein vergnüglicher Crashkurs in Sachen Naturwissenschaften

320 zweifarb. Bl., 12,5 x 16 cm, Abreißkalender, Harenberg

Bestell-Nr. 3093 **€ 15,99**

Täglich spannende Erklärungen aus Biologie, Physik, Chemie usw. Verblüffend leicht verständlich!

SIMPLIFY YOUR DAY

Einfacher und glücklicher leben

320 Bl. m. Cartoons, 12,5 x 16 cm, Abreißkalender, Campus

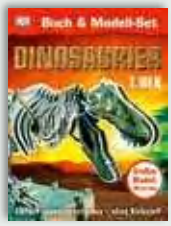
Bestell-Nr. 2174 **€ 12,99**

Schluß mit der Kompliziertheit des Lebens. Die Fülle praktischer und sofort umsetzbarer Tipps sowie die liebevollen Zeichnungen von Werner Tiki Küstenmacher sorgen für die tägliche Leichtigkeit des Seins.

Bequem bestellen:

- **direkt bei** www.science-shop.de
- **per E-Mail** info@science-shop.de
- **telefonisch** +49 6221 9126-841
- **per Fax** +49 711 7252-366
- **per Post** Postfach 810680 • 70523 Stuttgart

Für Bestellungen außerhalb Deutschlands und Österreichs berechnen wir € 3,50 Versandkosten. Alle Preise inkl. Umsatzsteuer. Preise unter Vorbehalt. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH



BUCH & MODELL-SET DINOSAURIER T-REX

Einfach zusammenstecken – ganz ohne Klebstoff

2012, Box mit Buch (32 S.) u. 81 Teilen für ein T-Rex-Modell, Dorling Kindersley

Bestell-Nr. 3720

€ 19,95 (D), € 19,95 (A)

Ganz ohne Klebstoff entsteht aus 81 stabilen Pappteilen ein komplettes Tyrannosaurus-Rex-Skelett, das etwa 30 cm hoch und ganze 80 cm lang ist. Das Buch enthält eine verständliche Anleitung für den Aufbau des Modells, die dabei zusätzliches Wissen über Aussehen, Verhalten und Lebensraum von Dinosauriern liefert. Ab 7 Jahren.

DAS GRÖSSTE ORIGAMI-BUCH ALLER ZEITEN

2012, 24 S. m. zahlr. Farbabb., 12 extragroße Faltblätter inkl., kart., Frech

Bestell-Nr. 3746

€ 9,99 (D), € 10,30 (A)

Buch aufklappen und loslegen: Alle Faltmodelle sind Schritt für Schritt erklärt und illustriert. Plus: 12 gemusterte Faltblätter zum Herausstrennen und sofort Losfalten.

Jürgen Brater

WAS MACHT DER U-BAHN-FAHRER, WENN ER AUF TOILETTE MUSS?

66 blitzgescheite Fragen rund um Alltag, Menschen und Tiere

2012, 159 S. m. zahlr. Farbfotos., ab 10 Jahren, geb., Beltz

Bestell-Nr. 3741 € 14,95 (D), € 15,40 (A)

Was macht der U-Bahn-Fahrer, wenn er auf Toilette muss? Vergiftet sich die Kobra, wenn sie auf ihre Zunge beißt? Wie heißt Barbie mit Nachnamen? Ob Naturwissenschaften, Alltag, Redewendungen oder Comics – Jürgen Brater hat sich unter Kindern umgehört und die interessantesten Fragen gesammelt, um sie verständlich, unterhaltsam und fundiert zu beantworten.

Carmen Skupin

ABENTEUER ELEKTRONIK

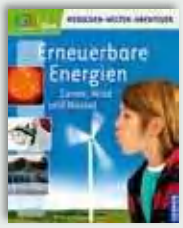
2012, Set aus Bauteilen und Buch, 24 S. m. zahlr. farb. Abb., ab 8 Jahren, Franzis

Bestell-Nr. 3742

€ 29,95 (D), € 29,95 (A)

Ob drinnen oder draußen, bei Tag oder Nacht, in diesem Set aus Buch und Bauteilen finden Kinder ab 8 Jahren immer das richtige Elektronikabenteuer.

Das Einzigartige an diesem Bastelbuch: alle elektrischen Teile sind bereits enthalten und die restlichen Materialien lassen sich in jedem Haushalt finden. Carmen Skupin will mit diesem Experimentierbuch Mädchen und Jungen für Elektronik begeistern.



Felix Homann

ERNEUERBARE ENERGIEN

Sonne, Wind und Wasser

1. Aufl. 2012, 64 S. m. zahlr. Farbabb., ab 9 Jahren, geb., Kosmos

Bestell-Nr. 3736

€ 12,95 (D), € 13,40 (A)

Ob zum Kochen, Fernsehen oder für PC-Spiele – wir benötigen Energiequellen, die umweltfreundlich und unendlich nutzbar sind, und neue Technologien, die es ermöglichen daraus Strom zu gewinnen. Die wichtigsten – von Bioenergie bis zum Off-Shore Windpark – werden in diesem Buch vorgestellt.

SPIONE

Agenten, Codes und Überwachung

2012, 192 S., über 1000 Farbfotografien, Zeichnungen und Grafiken, ab 10 Jahren, geb., Dorling Kindersley

Bestell-Nr. 3739

€ 16,95 (D), € 17,50 (A)

Woran erkennt man einen Spion? Wie knackt man verschlüsselte Nachrichten? Welche besonderen Fähigkeiten braucht man als Agent und welche Tricks gibt es? Dieses Buch enthüllt alles über Top-Spione und deckt ihre verborgenen Überwachungsmethoden auf.

SMARTPHONES, GAMES & INTERNET

So spannend ist die digitale Welt

2012, 144 S., über 500 Farbfotografien und Grafiken., ab 10 Jahren, geb., Dorling Kindersley

Bestell-Nr. 3738

€ 16,95 (D), € 17,50 (A)

Eine Einführung in die Welt des Internets, der Computer, Videospiele, Hightech-Geräte und Roboter.

Auf spannende Weise erfahren Kinder mehr über die Entwicklung, Vielfalt und technischen Details moderner Hightech-Geräte. Porträts bekannter Erfinder, interessante Grafiken und Teilansichten elektronischer Geräte vermitteln das Wissen einfach und leicht verständlich.

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich

KALENDER FÜR CLEVERE KIDS

Der Kinder Brockhaus

320 zweifarb. Bl., 12,5 x 16 cm, ab 8 Jahren, Brockhaus

Bestell-Nr. 1309 € 10,99

Der tägliche Kick für schlaue Kinder: Spannende Fakten, atemberaubende Rekorde und witzige Anekdoten, Rezepte und Experimente, knifflige Rätsel, exotische Tiere, vom WWF vorgestellt.

WISSEN FÜR KIDS

320 vierfarb. Bl., 12,5 x 16 cm, ab 10 Jahren, Harenberg

Bestell-Nr. 2870 € 12,99

Eine spannende Entdeckungsreise durch die Welt des Wissens. Farbenfrohes, kindgerechtes Layout.

Besuchen Sie uns im Internet unter:
www.science-shop.de

Kurze Erläuterung zu den Angaben hinter den Preisen: (D) ist der Preis für Deutschland, (A) der Preis für Österreich

BESTELLCOUPON

Gleich bestellen! Einfach Bestellcoupon kopieren und faxen an: 0711/7252-366 oder ausschneiden und per Post schicken: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH • Science-Shop • Postfach 810680 D-70523 Stuttgart. Schicken Sie eine E-Mail an: info@science-shop.de oder rufen Sie an unter: 06221/9126-841.

JA, ich bestelle und habe 14 Tage volles Rückgaberecht

Anzahl	Bestell-Nr.	Titel	€

Besteller-Anschrift:

Name/Vorname

Straße/Hausnummer

Datum/Unterschrift

E-Mail-Adresse

☐ **Zahlung per Bankeinzug**

Geldinstitut/Ort

Konto-Nr.

BLZ

Datum/Unterschrift

☐ **Zahlung per Rechnung**

PLZ/Wohnort

Kunden-Nr. (falls vorhanden)

XMAS12SDW

FUSIONSFORSCHUNG

Der lange Weg zum künstlichen Sonnenfeuer

Auf der Kernfusion ruhen viele Hoffnungen. Sie könnte sich als verhältnismäßig saubere und nahezu unerschöpfliche Energiequelle erweisen und in einigen Jahrzehnten einen beträchtlichen Teil des Strombedarfs der Menschheit decken. Doch ob das klappt, ist ungewiss. Denn Fusionsreaktoren stellen ihre Entwickler laufend vor neue Herausforderungen.

Von Gerhard Samulat

Nahezu alle unsere Energiequellen verdanken wir letztlich dem unaufhörlichen Leuchten der Sonne. Sie nährt Mikroben und Pflanzen, deren verrottende Überreste sich über Jahrmillionen hinweg in die fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas verwandelt haben. Sie wärmt das Land, die Weltmeere und die Atmosphäre, so dass unsere Kraftwerke die entstehenden Winde und Wasserkreisläufe nutzen können. Ihr Licht fällt auf Solarzellen und lässt Biomasse auf Äckern wachsen. Sogar die Kernkraft beruht letztlich auf der Aktivität zumindest von fernen Geschwistern der Sonne. Denn diese brüteten vor Äonen alle schweren chemischen Elemente aus – bis hinauf zum Uran, das wir heute in Kernreaktoren einsetzen. Da liegt es nahe, sich zur Energiegewinnung die Sonne zum Vorbild zu nehmen und zu versuchen, in einem Kraftwerk Wasserstoffatome zu Helium zu verschmelzen.

Der Gedanke ist faszinierend; die Umsetzung eine gewaltige technische Herausforderung. Das Vorbild lässt sich nicht einfach kopieren, herrschen im Schmelztiegel der Sonne doch Temperaturen von mehr als 15 Millionen Kelvin und unvorstellbar hohe Drücke von zum Teil über 20 Billiarden Pascal – 200 Milliarden Mal so hoch wie der irdische Luftdruck. Solche Werte sind mit technischen Mitteln wohl auch in absehbarer Zukunft dauerhaft kaum zu erreichen. Trotzdem gelang es Menschen schon mehrfach, das Sternenfeuer auf Erden zu entfachen.

Zum ersten Mal vor ziemlich genau 60 Jahren: Am 1. November 1952 zündeten die Vereinigten Staaten auf einem kleinen Atoll der pazifischen Marshallinseln ihre erste Wasserstoffbombe. Der Sprengsatz mit der Bezeichnung »Ivy Mike« war fast 1000-mal stärker als die Atombombe von Hiroschima. Wo sich einst das Inselchen Elugelab aus dem Wasser erhob, klafft heute ein tiefer Unterwasserkrater. Einige

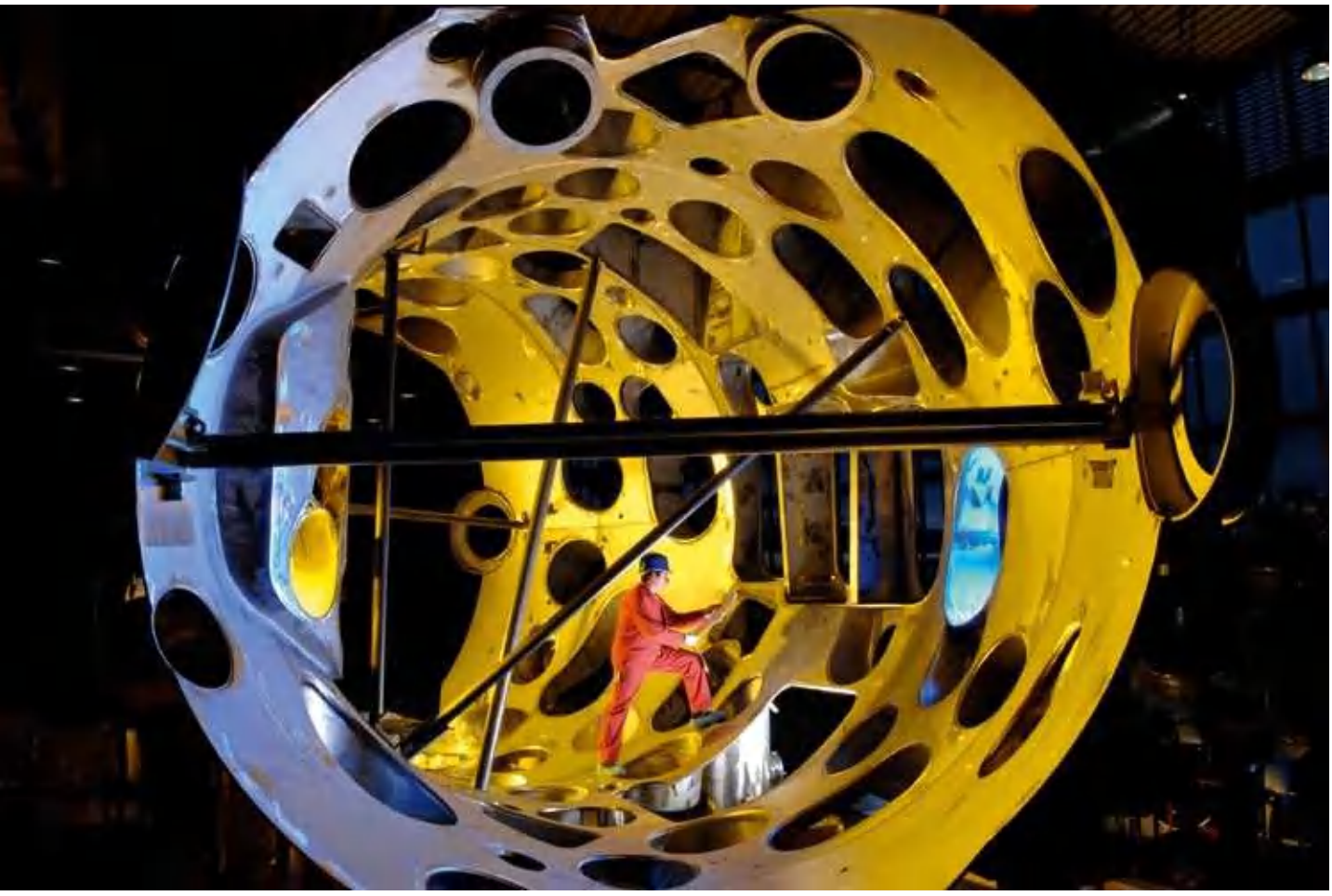
AUF EINEN BLICK

IN DER HEISSEN PHASE

1 Mit Hochdruck arbeiten Forscher an den **Kernfusionsreaktoren** ITER im südfranzösischen Kernforschungszentrum Cadarache und Wendelstein 7-X in Mecklenburg-Vorpommern.

2 Noch machen den Wissenschaftlern **viele technische Probleme** zu schaffen. Das heiße Plasma entweicht immer wieder, das Strukturmaterial wird brüchig oder radioaktiv, und das Brennmaterial existiert noch nicht in ausreichender Menge.

3 Welcher Anlagentyp – ob der Tokamak ITER oder der Stellarator Wendelstein 7-X – das Rennen macht und ob überhaupt je ein **funktionsfähiges Kraftwerk** gebaut wird, ist nicht nur aus technischen, sondern auch aus wirtschaftlichen Gründen ungewiss.



WOLFGANG FILSER, IPP MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

Im Schmelztiegel der Sonne herrschen 15 Millionen Kelvin. Im Fusionsreaktor Wendelstein 7-X sollen es einmal 100 Millionen Kelvin sein. Das Bild zeigt ein Modul des Außengefäßes. Durch seine mehr als 200 Öffnungen werden später Rohre, Kabel und Datenleitungen für Wasser, Helium, Strom und Sensoren führen.

Monate später brachte auch die UdSSR ihre erste Fusionsbombe zur Explosion.

Aber das Sternenfeuer bändigen, um in einem Kraftwerk Energie respektive Strom daraus zu gewinnen, können die Wissenschaftler bis heute nicht. Derzeit konzentrieren sich die Anstrengungen im Wesentlichen auf den International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) im südfranzösischen Kernforschungszentrum Cadarache sowie auf das Fusionsexperiment Wendelstein 7-X in Greifswald, Mecklenburg-Vorpommern. Die beiden Anlagen sollen grundsätzlich zeigen, ob sich das Verschmelzen von Wasserstoffisotopen zur industriellen Stromgewinnung nutzen lässt.

Fusionsexperimente gibt es auch anderswo. Mehrere Labors – allen voran die National Ignition Facility des kalifornischen Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) – untersuchen etwa Trägheitsfusion, bei der winzig kleine Wasserstoffkügelchen durch Bestrahlen mit Lasern oder Schwerionen zur Explosion gebracht werden sollen (siehe »Wann kommt der Fusionsreaktor?«, SdW 5/2010, S. 88). Doch zielen diese Experimente vor allem auf die Simulation von Kernwaffenexplosionen. ITER und Wendelstein 7-X dienen dagegen ausschließlich der zivilen Nutzung. Noch befinden sich beide Anlagen im Bau. Der ITER – im Lateinischen bedeutet »iter« der Weg – soll 2026 fertig werden. Er ist ein so genannter Tokamak, dessen aus dem Russischen abgeleiteter Name etwa so viel wie »Toroidale Kammer in Magnetspulen« heißt. Kennzeichen des Tokamaks ist seine verhältnismäßig einfache Magnetstruktur, mit der sich das – Plasma genannte – heiße Gemisch aus geladenen Teilchen für einige Zeit einschließen und erhitzen lässt. Die Anlage arbeitet gepulst, muss also periodisch hoch- und wieder heruntergefahren werden.

Wendelstein 7-X dagegen ist ein so genannter Stellarator. In ihm erzeugen überaus komplex geformte Spulenkörper eine Art magnetischer Flasche, die das Fusionsplasma einsperrt. »Ob der Tokamak das Rennen macht oder der Stellarator, ist heute schwer zu sagen«, sagt Sibylle Günter, Wissenschaftliche Direktorin des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik (IPP) in Garching, das ebenso wie die Forschungszentren Jülich und Karlsruhe maßgeblich an beiden Experimenten beteiligt ist.

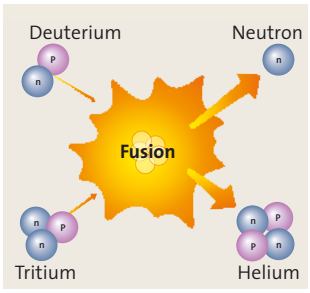
Wichtigste Voraussetzung für die Fusionsreaktion sind in jedem Reaktortyp hohe Temperaturen und Drücke. Nur dann überwinden die Atomkerne die elektrischen Kräfte, mit denen sie sich normalerweise gegenseitig abstoßen, und geraten in den Einflussbereich der kurzreichweitigen starken Kernkraft ihrer Fusionspartner, die sie miteinander verschmelzen lässt.

Die Erzeugung hoher Temperaturen fällt den Experimentatoren vergleichsweise leicht. Die für eine Fusion angepeilten 100 Millionen Kelvin – das ist mehr als das Fünffache der Temperatur im Inneren der Sonne – sind keine Herausforderung mehr. Das Problem ist der Druck. Damit ein heißes Plasma dauerhaft magnetisch eingeschlossen bleibt, darf er einige Bar nicht überschreiten. Dieser Wert ist bei einem 100 Millionen Kelvin heißen Plasma schnell erreicht. Deshalb können die Physiker das Wasserstoffgas nur sehr verdünnt in die Fusionskraftwerke einleiten: mit etwa einem 250 000stel des Atmosphärendrucks, was nach Alltagsmaßstäben schon ein Vakuum ist.

Ein Gramm Fusionsbrennstoff ersetzt elf Tonnen Kohle

Im Unterschied zur Sonne, die vorzugsweise mit normalem Wasserstoff arbeitet, planen die Wissenschaftler zudem, die beiden schwereren Isotope dieses leichtesten aller chemischen Elemente miteinander zu verschmelzen: Deuterium und Tritium. Während der Wasserstoffkern aus lediglich einem Proton besteht, enthalten Deuterium- und Tritiumkerne zusätzlich ein beziehungsweise zwei Neutronen. Diese elektrisch neutralen Kernbausteine unterliegen ebenso der starken Wechselwirkung, die für die Fusion ausschlaggebend ist, und erhöhen so die Wahrscheinlichkeit einer Verschmelzung.

Die Fusion von einem Gramm eines Deuterium-Tritium-Gemischs setzt eine Energiemenge von gut 26 000 Kilowattstunden frei. Das entspricht dem Energiegehalt von elf Tonnen Kohle. Damit lässt sich ein Durchschnittshaushalt gut ein Jahr lang mit Strom und Wärme versorgen.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK

Wenn Deuterium und Tritium miteinander verschmelzen, entstehen ein Heliumatomkern sowie ein schnelles Neutron. Letzteres gibt seine Bewegungsenergie anschließend als Wärme ab, die sich zur Stromgewinnung nutzen lässt.

Das Ganze funktioniert, weil einzelne Protonen und Neutronen in der Summe stets mehr Masse besitzen als der Atomkern, zu dem sie sich zusammenschließen. Die Massendifferenz wird gemäß Einsteins berühmter Formel $E = mc^2$ (E steht für Energie, m für Masse und c für die Lichtgeschwindigkeit) als Energie frei. Pro Reaktion eines Deuteriumkerns mit einem Tritiumkern sind das 17,6 Millionen Elektronvolt (MeV). Bei der Reaktion wird ein Neutron fortgeschleudert, das vier Fünftel der Energie aufnimmt. Ferner entsteht ein Heliumkern, der sich aus zwei Protonen und zwei Neutronen zusammensetzt und ein Fünftel der Energie mitbekommt. Durch Stöße mit benachbarten Deuterium- und Tritiumkernen geben die Heliumkerne ihre Energie wieder ab und erhalten so die Temperatur des Plasmas aufrecht. Die Neutronen treffen hingegen mit hoher Geschwindigkeit auf so genannte Blankets, die Teil der inneren Hülle des Plasmagefäßes sind. In diesem Material geben sie ihre Energie durch Stöße mit Lithiumatomen als Wärme ab. Diese wird dann über Wärmetauscher und Dampfturbinen in Elektrizität umgewandelt.

IPP MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

Noch bis August 2014 dauern die Arbeiten an Wendelstein 7-X; dann geht der Stellarator in Betrieb. Im Inneren des Plasmagefäßes (Zentrum des Bilds) werden später Temperaturen um 100 Millionen Kelvin herrschen, während die umgebenden Magnetspulen (siehe auch das Bild auf S. 62) auf ultratiefe Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt abgekühlt sind.

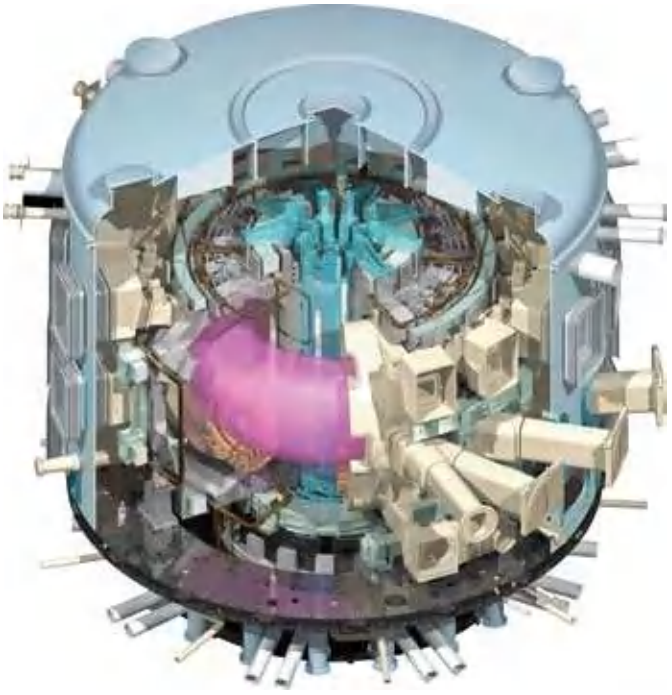
Sowohl ITER als auch Wendelstein 7-X sind das Ergebnis weltweiter Arbeitsteilung und haben viele »Väter«: Neben der europäischen Versuchsanlage Joint European Torus JET in Culham, Großbritannien, dem Textor in Jülich sowie der größten deutschen Fusionsanlage Asdex Upgrade in Garching und einigen weiteren Forschungsreaktoren in Europa gibt es beispielsweise ebenso in den Vereinigten Staaten, Japan, Südkorea, Indien und China neue oder entstehende Anlagen. Dabei handelt es sich zumeist um Tokamaks, deren Entwicklungsreife höher ist als die der Stellaratoren. Kraftwerksgröße besitzt jedoch noch keine von ihnen. Allerdings denkt die chinesische Regierung wohl mittlerweile darüber nach, ein eigenes Fusionskraftwerk von den Dimensionen eines ITER zu bauen. Offensichtlich geht ihnen der Bau in Cadarache, an dem sie ebenfalls beteiligt sind, zu langsam voran.

Ein richtiges Kraftwerk benötigt einen Durchmesser von 45 Metern

Im August 2014 soll Wendelstein 7-X im vorpommerschen Greifswald fertig sein. Noch geht es in der Werkshalle zu wie auf einer Werft. Ohrenbetäubendes Pfeifen und Dröhnen erfüllt den Raum, als würde irgendjemand kontinuierlich Druckluft ablassen. Ab und zu hört man das Kreischen eines Winkelschleifers oder Arbeiter, die sich etwas zurufen. Musik dröhnt aus einem Kofferradio: »Blue Bayou« und »La Paloma ohe«. Die Arbeiten an dem rund eine Milliarde Euro teuren Gerät laufen im Zweischichtbetrieb an sechs Tagen pro Woche, manchmal das gesamte Wochenende durch. »Ein Erholungscamp ist das nicht«, sagt der wissenschaftliche Leiter des Projekts, Thomas Klinger.

Im Verlauf einiger Jahre sind die fünf je 120 Tonnen schweren Module der »Maschine«, wie Klinger das Metallungetüm liebevoll nennt, zusammengesetzt und auf einer Stahlkonstruktion zusammengesetzt worden. Der Stellarator gleicht nun einem überdimensionalen Donut mit einem Außendurchmesser von 16 Metern. Um wirtschaftlich zu arbeiten, müssen Fusionskraftwerke nach aktuellem Stand der Forschung aber deutlich größer ausfallen. »Ein richtiges Kraftwerk bräuchte wohl etwa 45 Meter Durchmesser und ein entsprechend größeres Volumen«, kalkuliert Klinger. »Bei jedem Schritt überlegen wir daher, ob er jeweils kraftwerksrelevant ist.« Alles, was hier erprobt wird, soll auch im industriellen Maßstab funktionieren.

Der Schlauch des Donuts – Experten sprechen von einem Torus – ist bis zu fünf Meter dick. Die äußere Gefäßwand besteht »quasi nur aus Löchern«, scherzt Klingers Kollege Lutz Wegener, der in Greifswald den Baufortschritt überwacht. Durch die über 200 Öffnungen werden später einmal Rohre, Kabel und Datenleitungen für Wasser, Helium, Strom und Sensoren führen (siehe das Bild auf S. 59). Der Torus enthält zudem den Kryostaten, der die supraleitenden Magnete umgibt. Ebenfalls in seinem Inneren verläuft die schlauchförmige Vakuumkammer, die künftig das Plasma aufnehmen soll.



IPP MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

30 Meter hoch ist der Tokamak ITER, in dem ab 2020 erste Experimente mit Wasserstoff stattfinden sollen. Erst gegen Ende der 2020er Jahre wird ein Deuterium-Tritium-Gemisch verwendet, wie es für den Kraftwerksbetrieb nötig ist. Das Volumen des Energie liefernden Plasmas beträgt 837 Kubikmeter, bei einer Masse von gerade einmal 0,5 Gramm.

Die innerste oder »erste Wand«, die später dem Plasma am nächsten sein wird, ist der geschwungenen Form des Plasmaschlauchs nachempfunden. »In dieser Wand gibt es bohnenförmige und annähernd dreieckige Abschnitte, die zwischen eineinhalb und teilweise über drei Meter hoch sind«, erläutert Wegener. Auffallend gebogen ist auch die Form von 50 der insgesamt 70 Spulenkörper des Stellarators, die später den Magnetkäfig formen sollen. Obgleich ihnen eine ganz bestimmte Helixstruktur zu Grunde liegt, die in jahrelangen numerischen Berechnungen ermittelt wurde, sehen sie aus, als hätte Salvador Dalí persönlich Hand angelegt.

Die Spulen bestehen aus einer supraleitenden Niob-Titan-Legierung – dem gleichen Material, aus dem auch die Ablenkmagnete des Teilchenbeschleunigers LHC bei Genf gefertigt sind. Kühlt man sie mit flüssigem Helium auf vier Grad über dem absoluten Temperaturnullpunkt, transportieren sie Ströme von bis zu 18 000 Ampere verlustfrei. Sie erzeugen ein Bündel von Magnetfeldlinien, welches das nur wenige Milligramm schwere Plasma in Form und in der Schwebe hält. Durch die magnetischen Feldlinien ist es »versklavt«, wie die Fachleute sagen: Parallel zu den Feldlinien können sich die Ladungsträger – Elektronen ebenso wie Ionen – zwar frei bewegen, senkrecht dazu ist ihre Mobilität dagegen vollständig eingeschränkt. Damit nehmen die Forscher der Ladungswolke eine ganze Menge von ihrem chaotischen Charakter.

Ob das Magnetfeld hält, was es verspricht – nämlich das ultraheiße Plasma viele Minuten lang einzusperren –, soll

Wendelstein 7-X herausfinden. Die Ziele sind hochgesteckt: »Mit dem Stellarator wollen wir in erster Linie kraftwerksrelevante Temperaturen und Plasmadichten erzielen und sie an die Leistungsdaten eines Tokamaks heranführen«, sagt Klinger, »oder diese vielleicht sogar übertreffen.« Zudem wollen die Forscher bei 100 Millionen Kelvin Stöße zwischen Deuterium und Wasserstoff beobachten. Bei dieser Temperatur befindet sich in etwa das Maximum der Wirkungsquerschnittskurve, die angibt, wie hoch die Wahrscheinlichkeit für die Fusion zweier Kerne ist.

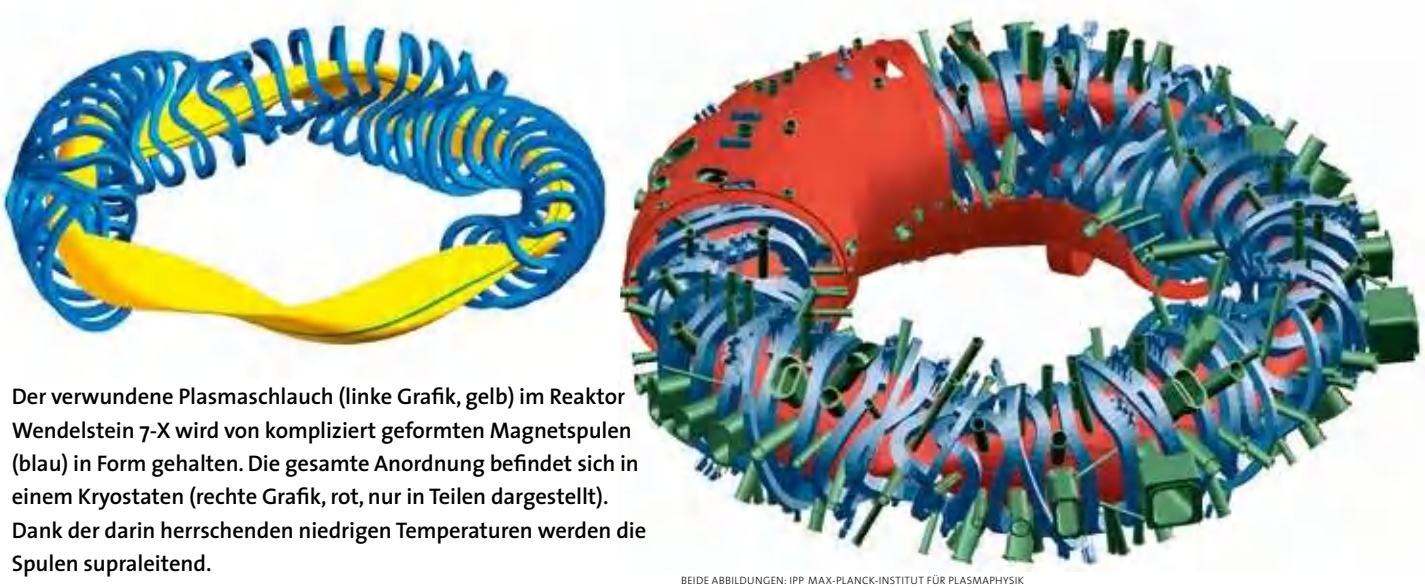
»Der Müll strahlt nach einigen hundert Jahren weniger als abgebrannte Kohle«

Experimente mit Tritium sind bei Wendelstein 7-X zunächst nicht vorgesehen; die Substanz ist leicht radioaktiv und schwierig zu handhaben. Allerdings können Atomkerne in den Magneten oder dem Reaktorgefäß umherfliegende Neutronen einfangen und dadurch radioaktiv werden. Geeignete Materialien sollen verhindern, dass dabei hochradioaktive Stoffe mit langen Halbwertszeiten entstehen. Die Entwickler planen beispielsweise, die klassischen Beimischungen von Stahllegierungen – Nickel, Niob und Molybdän – durch Titan, Wolfram oder Tantal zu ersetzen. Dann, so erwarten sie, entstehen weniger langlebige Radionuklide als in heutigen Kernkraftwerken, und das trotz beträchtlich größerer Neutronenflussdichte. Trotzdem müssen Wartungsarbeiten oder Reparaturen im inneren Bereich eines Fusionskraftwerks künftig ferngesteuert stattfinden. »Doch selbst wenn wir das bei der Fusion aktivierte Material hinzuzählen, strahlt der Müll nach einigen hundert Jahren weniger als abgebrannte Kohle«, sagt die Max-Planck-Physikerin Günter.

Die Wahl der Werkstoffe ist in vielerlei Hinsicht entscheidend. Neutronen aus einer Fusionsreaktion besitzen so viel Energie, dass sie selbst tief im Stahl sitzende Atome herausschlagen können und ihn mit der Zeit brüchig werden lassen. Deswegen müssen die Betreiber das Innere der Kraftwerke sowie die tragenden Komponenten des Reaktors wohl alle zwei bis drei Jahre austauschen. Auch sind die Materialien hohen thermischen Belastungen ausgesetzt. Ähnlich wie in einer gewöhnlichen Leuchtstoffröhre, in der das Plasma einige tausend Kelvin heiß werden kann und an der wir uns trotzdem nicht die Finger verbrennen, nimmt auch die Temperatur der Plasmawolke im Fusionsreaktor nach außen hin rasch ab. Dennoch entstehen Wärmeflüsse von bis zu 20 Megawatt pro Quadratmeter. Daher ist das Innere der Plasmagefäße oft mit kohlefaserverstärkten Graphitkacheln ausgekleidet – so wie die Unterseite der Spaceshuttles, die bei der Rückkehr in die Erdatmosphäre ähnliche Belastungen aushalten mussten. Allerdings hatten die Shuttles schon nach rund einer Minute das Schlimmste überstanden, während die Kacheln in den Stellaratoren oder Tokamaks der Gluthitze bis zu eine halbe Stunde widerstehen sollen. Darum werden sie gekühlt – in Wendelstein 7-X beispielsweise mit Wasser.

Beim ITER hingegen werden große Teile der innersten Wand voraussichtlich nicht aus Graphit bestehen. Denn der Kohlenstoff im Graphit neigt dazu, Wasserstoff respektive Tritium einzulagern. Verunreinigungen können dann von der Wand abflocken und in das empfindliche Plasma dringen. Radioaktiven Staub im Reaktor gilt es jedoch zu vermeiden.

Den optimalen Werkstoff suchen die Wissenschaftler aber immer noch. Auch Wolfram ist nicht ideal, denn Metalle mit hohen Kernladungszahlen sind stets problematisch. Wenn das ständige Bombardement mit schnellen Plasmateilchen solche Atome aus den Metallwänden herausschlägt, verlieren sie in der Plasmaglut rasch ihre äußeren Elektronen, was wiederum zu Umverteilungen zwischen den Orbitalen führt. Dabei wird Röntgenstrahlung frei, deren Energie mit der vierten Potenz der Kernladungszahl steigt. »Die Verunreinigungen leuchten dann wie ein Christbaum«, sagt Klinger. Die Partikel geben die Energie, die ihnen mühsam zugeführt wurde, so gleich wieder ab. Das kühlt die Ladungswolke und stoppt im schlimmsten Fall die Fusionsreaktion.



Der verwundene Plasmaschlauch (linke Grafik, gelb) im Reaktor Wendelstein 7-X wird von kompliziert geformten Magnetspulen (blau) in Form gehalten. Die gesamte Anordnung befindet sich in einem Kryostaten (rechte Grafik, rot, nur in Teilen dargestellt). Dank der darin herrschenden niedrigen Temperaturen werden die Spulen supraleitend.

BEIDE ABBILDUNGEN: IPP MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

IPP-MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

Schon seit 1991 ist am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik auch die mit fünf Meter Radius größte deutsche Kernfusionsanlage ASDEX Upgrade in Betrieb. Dieser Blick ins Innere des Tokamaks zeigt das 100 bis 200 Millionen Kelvin heiße Plasma.

Das Erdalkalimetall Beryllium besitzt die gewünschte niedrige Kernladungszahl und neigt überdies nicht zu chemischer Erosion. Teile der europäischen Versuchsanlage JET in Culham, an der es schon 1991 erstmals gelungen war, Energie freizusetzen, sind damit ausgekleidet. Beryllium kommt in der Natur jedoch zu selten vor, als dass man damit eine große Zahl von Fusionskraftwerken bauen könnte. Zudem ist es giftig und Krebs erregend. Auch Silizium-Karbid-Keramiken oder Legierungen auf Vanadiumbasis hätten ihren Reiz. Sie werden unter Neutronenbeschuss nur wenig radioaktiv, sind als Wandmaterial allerdings noch wenig getestet. Jüngst zeigten aber Ergebnisse vom JET-Experiment, dass die Kombination von Beryllium als Wandmaterial und Wolfram für den Boden des Gefäßes bessere Bedingungen für ein hochreines Plasma liefert.

Doch es müssen nicht nur die Wände vor den energiereichen Neutronen geschützt werden, sondern ebenso die supraleitenden Magnete, die das Plasma in Form halten. Denn die elektrisch neutralen Teilchen können die Magnetfelder ungehindert durchdringen. Gelingt das zu vielen von ihnen, kommt es zum so genannten Quench: Die Supraleitung bricht zusammen, und die Leitfähigkeit des Materials nimmt augenblicklich ihren normalen Wert an. Das erhitzt die Spulen rasch und bringt sie zum Schmelzen. »Deswegen haben wir im Keller große Nickelwiderstände aufgestellt, auf die wir den Strom blitzschnell übertragen können, um ihn dort kontrolliert in Wärme umzuwandeln«, erläutert Wegener. Wegen der erwarteten hohen Neutronenflut in einem Kraftwerk wird die Abschirmung zwischen Plasma und Magneten, die zum Teil aus den schon erwähnten Blankets besteht, etwa einen Meter dick sein müssen.

Die Blankets müssen eine weitere zentrale Funktion erfüllen: Fangen die Lithiumatome in ihnen energiereiche Neutronen ein, entsteht durch eine Kernreaktion neben Helium vor allem das als Brennstoff begehrte Tritium. Dieses Gas soll gesammelt und dem Plasma wieder zugeführt werden. Für die beständige Eigenversorgung eines Reaktors müsste allerdings jedes Neutron aus der Fusion auf genau ein Lithiumatom treffen und mit diesem die Reaktionskaskade durchlaufen. Doch natürlich gehen Neutronen verloren. Das Blanket kann den umgebenden Raum nicht lückenlos abdecken, außerdem fliegen manche Neutronen einfach hindurch. Und schließlich zerfällt ein kleiner Teil des Tritiums, das nur eine Halbwertszeit von knapp über zwölf Jahren hat, noch bevor es zurück in die Brennkammer gelangt.

Deswegen planen die Experimentatoren, dem Lithium Blei oder Beryllium beizufügen. Diese Elemente wirken als Neutronenvervielfacher: Trifft ein Neutron auf diese Stoffe, kommt es zu Kernreaktionen, wobei zwei der neutralen Kernbausteine entstehen. Ob das funktioniert, müssen die Forscher zwar erst noch nachweisen. Aber mehr als »simple Neutronenphysik« sei das nicht, sagt Sibylle Günter (siehe das Interview ab S. 64).

Tokamaks und Stellaratoren stehen vor denselben Herausforderungen

Anfangs müssen aber wohl gewöhnliche Kernreaktoren die Tritiumversorgung übernehmen. Als Nebenprodukt fallen bei ihrem Betrieb jährlich pro Kraftwerk rund zwei Kilogramm dieses radioaktiven Stoffs an. Ein Fusionskraftwerk mit einer elektrischen Leistung von einem Gigawatt benötigt jedoch über ein Kilogramm Tritium pro Woche. Tritium könnte also zumindest in der Anlaufphase der kommerziellen Fusionsenergienutzung einen Engpass darstellen, während Deuterium etwa in Meerwasser ausreichend vorkommt.

Im Wesentlichen stehen Tokamaks und Stellaratoren vor denselben technischen Herausforderungen. Der Unterschied liegt vor allem in der Form und den Eigenschaften der Magnetfelder. Die Tokamakforscher in Cadarache, die auf ein

INTERVIEW

»Von Meilenstein zu Meilenstein«

Bis zum ersten Fusionskraftwerk ist es noch ein langer Weg. Lohnt es sich überhaupt, ihn zu gehen? »Spektrum der Wissenschaft« hat mit **Sibylle Günter** gesprochen, der Wissenschaftlichen Direktorin des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik in Garching.

Spektrum der Wissenschaft: Frau Professor Günter, nach dem Willen der Bundesregierung soll der Anteil an erneuerbaren Energien bis zum Jahr 2050 auf 80 Prozent steigen. Wie viel Raum bleibt da noch für die Kernfusion?

Sibylle Günter: Nicht jedes Land wird seinen Energiebedarf in diesem Ausmaß aus erneuerbaren Energien decken können. Selbst in Deutschland fehlt dafür noch die nötige Infrastruktur wie beispielsweise kostengünstige Energiespeicher.

Wir müssen das Energieproblem aber vor allem global betrachten. Und die Prognosen lauten, dass sich der Strombedarf bis zum Jahr 2100 weltweit um den Faktor sechs erhöht. Spätestens um das Jahr 2050 werden aber die konventionellen Öl- und Gasreserven zur Neige gehen. Kohle reicht deutlich länger, verursacht aber natürlich weiterhin Klimaprobleme. Damit sich keine Energielücke öffnet, müssen wir uns also etwas einfallen lassen. Wir halten die Fusion für eine sinnvolle Möglichkeit. Sie könnte im Jahr 2100 einen Anteil von etwa 15 Prozent am Energiemix haben. Fusionskraftwerke sind zudem grundlastfähig. Wenn Sie eine Großstadt wie beispielsweise Schanghai mit Strom versorgen wollen, wird Ihnen das kaum mit Windenergie gelingen.

Wie viele Fusionsmeiler bräuchte man denn?

Günter: Fusionskraftwerke sollten konventionelle Kraftwerke sowie Atommeiler ersetzen. Sie würden gut in die bestehende Infrastruktur passen und mit einem Gigawatt etwa so viel elektrische Leistung abgeben wie ein großes Kohlekraftwerk. Die Zahl der künftigen Fusionsmeiler ist aber auch eine Frage der gesellschaftlichen Akzeptanz.

Billig ist Fusionsenergie ja nicht.

Günter: Hoch sind die Anfangsinvestitionen. Sie liegen für einen Fusionsreaktor vermutlich in der Größenordnung, die auch für ein Spaltungskraftwerk anfallen. Der Brennstoff kostet dagegen fast nichts. Experten schätzen, dass Strom aus Fusionsenergie künftig etwa so viel kosten wird wie der aus Windenergie und wahrscheinlich deutlich billiger sein wird als der Strom aus Fotovoltaik, wenn man alle Aufwendungen für die Speicher und die Infrastruktur jeweils mit hineinrechnet.

Woher wollen Sie den Brennstoff beziehen? Insbesondere Tritium kommt auf der Erde ja nur sehr selten vor.

Günter: Die Erstausstattung mit Tritium muss aus Kernreaktoren kommen. Mittelfristig will die Fusion aber unabhängig von der Spaltung werden. Deswegen planen wir, das Tritium künftig von den Fusionsreaktoren erbrüten zu lassen. Dazu kleiden wir deren Innenwände mit Elementen aus, die aus angereichertem Lithium-6 bestehen und zusätzlich Neutronenvervielfältiger aus Blei oder Beryllium enthalten. Das ist simple Neutronenphysik. Sicherzustellen, dass genug Tritium erbrütet wird, ist dann nur noch eine Frage der Ingenieurskunst.

Einige Reaktorkomponenten werden hohen thermischen Belastungen ausgesetzt sein, außerdem werden sie unablässig durch energiereiche Neutronen bombardiert. Welche Materialien sollen das auf Dauer aushalten?

Günter: Die meisten Materialien, die ein erstes Demonstrationskraftwerk benötigt, existieren bereits. Was noch entwickelt werden muss, sind die Komponenten, die ganz dicht am Plasma dran sind und sehr hohe Wärme- und Neutronenbelastung aushalten müssen. Kupfer wäre für die Wärmeableitung am besten geeignet, wird aber durch Neutronenbeschuss stark radioaktiv. Der Divertor, der sozusagen die heißen Abgase aus der Fusionsreaktion abführen soll, wird voraussichtlich aus hitzebeständigem Wolfram bestehen. Und das Reaktorgefäß fertigen wir wohl aus oxiddispersionsgehärtetem, ferritisch-martensitischem Stahl, der thermisch sehr hoch belastbar ist und seine Eigenschaften selbst unter starkem Neutronenbeschuss kaum einbüßt. In der Fusionsforschung arbeiten wir aber auch an neuen Materialien, die durch Neutronenbeschuss kaum radioaktiv werden. Doch das ist noch Zukunftsmusik.

AXEL GRIESCH FOTOGRAFIE

Sibylle Günter ist seit Februar 2011 Wissenschaftliche Direktorin des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik. Schon seit 2000 leitet sie dort die Abteilung Tokamaktheorie. Die theoretische Physikerin lehrt zudem an den Universitäten Rostock und München.

Sie haben bereits angedeutet, dass die Fusion nicht frei von Radioaktivität ist. Wie groß ist das Problem?

Günter: Bemerkenswerterweise ist die Furcht vor Radioaktivität besonders in Deutschland groß. Die Leute gehen trotzdem zum Röntgen oder zur Computertomografie, ohne sich darüber Gedanken zu machen, oder setzen sich beim Fliegen freiwillig der Höhenstrahlung aus.

Zunächst einmal haben wir bei der Fusion keine radioaktiven Endprodukte. Daher gibt es keine langlebigen radioaktiven Abfälle. Außerdem fehlt die von den kurzlebigen radioaktiven Endprodukten erzeugte Nachwärme, die etwa beim Kraftwerk in Fukushima zur Kernschmelze geführt hat. Während des Kraftwerksbetriebs kann es auch nicht zu unkontrollierbaren Leistungsanstiegen kommen. Im Gegenteil: Bei der kleinsten Störung erlischt das Plasma, und die Neutronenproduktion hört schlagartig auf.

Tritium selbst hat eine Halbwertszeit von nur etwas mehr als zehn Jahren. Auch die Halbwertszeit der aktivierten Materialien in einem Fusionskraftwerk ist viel geringer als die der Abfallprodukte in einem Spaltungskraftwerk. In wenigen hundert Jahren sind die Stoffe schwächer radioaktiv als beispielsweise die Asche von Kohle. Wir gehen davon aus, dass das anfallende radioaktive Material nur rund 100 Jahre lang auf dem Kraftwerksgelände verwahrt werden muss.

Der Weg zum ersten Fusionskraftwerk ist lang. Werden Sie nicht manchmal ungeduldig ob des zähen Fortschritts? Lässt sich so überhaupt der Forschernachwuchs begeistern?

Günter: Selbstverständlich geht auch mir manches zu langsam. Aber als Wissenschaftler ziehen wir unsere Befriedigung daraus, immer etwas Neues verstanden und erreicht zu haben. Und Fortschritte sind in der Fusionsforschung durchaus messbar. Ähnlich wie sich in der Computerindustrie die Anzahl der Transistoren pro Chip alle zwei Jahre verdoppelt, verdoppelt sich bei uns ein Parameter, der unseren Erfolg misst. Er ist das Produkt aus Temperatur, Teilchendichte und Energie-Einschlusszeit, Letztere ein Maß für die Wärmeisolation. Dieser Wert hat sich seit den 1960er Jahren um den Faktor 100 000 erhöht. Bis zu einem Energie liefernden Fusionskraftwerk fehlt jetzt noch etwa ein Faktor fünf bis zehn. Die erste Anlage vom Tokamaktyp erreichte eine Temperatur von knapp drei Millionen Kelvin. Heute liegen wir bei 400 Millionen Kelvin. Natürlich haben wir damit noch kein Fusionskraftwerk. Aber wir arbeiten uns von Meilenstein zu Meilenstein voran. Und wenn Sie für ein so ambitioniertes Projekt eine Planung aufstellen, dann stellen Sie fest, dass 40 Jahre gar nicht so lang sind.

Der ITER ist daher eine sehr spannende Sache, insbesondere für den Nachwuchs. Seit die Entscheidung für den Bau gefallen ist, haben wir wieder deutlich mehr Studenten in den Vorlesungen. Die stört es nicht, dass er erst in etwa zehn Jahren in Betrieb gehen wird. Sie sehen, dass es vorangeht. Und jemand, der jetzt anfängt, kann noch alles gut miterleben.

Die internationalen Anstrengungen scheinen sich ja auf den ITER zu konzentrieren, bei dem das Tokamakkonzept verfolgt wird. Warum bauen Sie mit Wendelstein 7-X in Greifswald dennoch einen Stellarator?

Günter: Ob der Tokamak das Rennen macht oder der Stellarator, ist heute schwer zu sagen. Der Tokamak hat momentan einen großen Vorsprung. Doch das Stellaratorkonzept ist sehr viel versprechend. Die Erfahrungen mit Wendelstein 7-X werden wir nutzen, um auch den Stellarator zu einem Kraftwerk weiterzuentwickeln. Erst dann können wir entscheiden, welche Technik sich schlussendlich am besten für ein Kraftwerk eignet. Ich kann mir auch vorstellen, dass beide Varianten zum Zuge kommen. Für Autos gibt es ja ebenfalls sowohl Diesel- als auch Benzinmotoren. Die Zukunft wird zeigen, welcher Weg der beste ist.

Das Gespräch führte **Gerhard Samulat**.

MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de

Unser Online-Dossier »Energie«
finden Sie unter

www.spektrum.de/energie

axialsymmetrisch geformtes Magnetfeld setzen, machen sich zu Nutze, dass Plasma anfänglich ein sehr guter elektrischer Leiter ist. Um die Ladungswolke aufzuheizen, erhöhen sie einfach die Stärke des äußeren Magnetfelds. Ähnlich wie bei einem modernen Induktionsherd in einer Küche ruft dieses dann einen Heizstrom im Plasma hervor. Doch ist ein Strom stets eine Quelle freier Energie, was zu Instabilitäten im Plasma führt: »In einem Tokamak können innerhalb von Millisekunden Stromänderungen von einigen Megaampere auftreten«, sagt Max-Planck-Forscher Klinger. Dann kollabiert das Plasma, »es verschwindet wie eine Illusion«. Auch der Träger des Stroms ist damit weg, diesem wird »quasi der Teppich unter den Füßen weggezogen«, so Klinger.

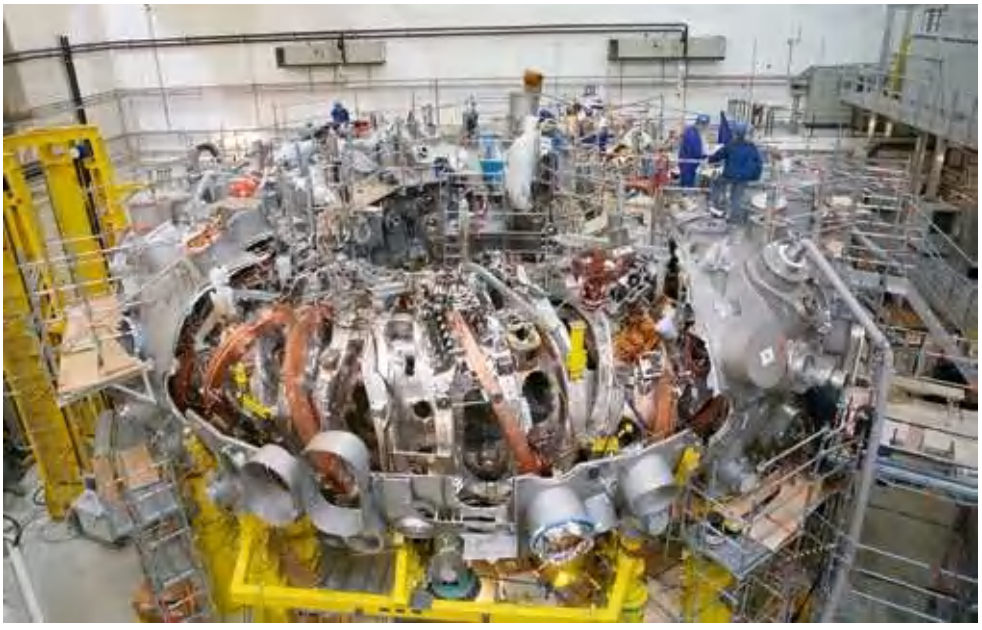
Der unkontrollierte Zusammenbruch des Plasmastroms kann Komponenten der ersten Wand überhitzen. Das verkürzt deren Lebensdauer. Darüber hinaus können solche »disruptiven Instabilitäten« extreme mechanische Kräfte freisetzen. »Kollegen erzählen mir, dass der JET in Culham dabei schon mal ein Zentimeterchen hüpfen kann, obwohl er einige tausend Tonnen wiegt«, berichtet Klinger. Immerhin lässt sich diese Art von Plasmainstabilität durch zeitnahes Einblasen von Heliumgas in die Ladungswolke oder durch gezielten Beschuss mit Mikrowellen mildern oder gar unterdrücken.

In Stellaratoren wird das Plasma dagegen ausschließlich durch Mikro- oder Radiowellen oder durch das Einschießen schneller neutraler Wasserstoffatome aufgeheizt. Dennoch sind auch hier Plasmainstabilitäten eine der größten Herausforderungen der Forscher. Die Ladungswolke verhält sich wie ein weicher Luftballon, den man versucht, mit den Händen zusammenzuquetschen: Je mehr man drückt, desto mehr sträubt sich das Plasma gegen den Einschluss. Es bildet Ausstülpungen, die immer wieder durch den Magnetkäfig schlüpfen und die inneren Komponenten des Plasmagefäßes stark belasten können.

Gewisse Turbulenzen sind jedoch sogar erwünscht, denn das Plasma kann dadurch Verunreinigungen auswerfen. Die Forscher versuchen die Wirbel so zu lenken, dass dies vorzugsweise an den Prallplatten der so genannten Divertoren geschieht, der hitzeresistenten »Mülltonnen« der Fusionskraftwerke. Da aber auch diese nicht zu heiß werden dürfen, horchen Mikrowellensensoren kontinuierlich ins Plasmagefäß, so wie ein Arzt seinen Patienten mit dem Stethoskop abhört. Aus den Signalen gewinnen die Experimentatoren ein Profil der Plasmadichte und können rasch reagieren, falls etwas aus dem Ruder zu laufen droht.

Einige der Instabilitäten lassen sich durch zusätzliche stromdurchflossene Spulen unterdrücken. Am Asdex-Upgrade-Reaktor in Garching sind kürzlich entsprechende Experimente durchgeführt worden. »Das funktioniert prächtig«, sagt Sibylle Günter, »die thermischen Belastungen der Platten haben messbar abgenommen.«

Es gibt aber noch ein weiteres Problem mit Tokamaks: Sie arbeiten gepulst. Das Plasma wird zunächst über ein ansteigendes, äußeres Magnetfeld erhitzt. Doch irgendwann ist der Maximalwert der Feldstärke erreicht. Nach einigen Minuten bis zu einer Stunde endet daher der Zyklus: Das Plasma erlischt, und alles beginnt von vorne. Die Dampferzeuger reagieren zwar ausreichend träge, um diesen Wechsel abzufangen. Die meisten Ingenieure sehen solch drastische Lastwechsel allerdings skeptisch, denn meist verkürzen sie



IPP MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

Allmählich nimmt Wendelstein 7-X seine endgültige Gestalt an. Dieses Foto lässt noch einen letzten Blick auf sein Inneres erhaschen. Im Dezember 2011 wurde dann das noch fehlende Stück der Außenhülle installiert.

Gibt es Alternativen?

Die ersten Entwürfe für Fusionsreaktoren entstanden Anfang der 1950er Jahre. Damals schätzte der amerikanische Physiker Lyman Spitzer von der Princeton University, sein »Stellarator« könnte 150 Megawatt Leistung aufbringen, genug für etwa 150 000 Haushalte. In der Sowjetunion entwarfen Andrej Sacharow und Igor Tamm 1952 dagegen den so genannten Tokamak.

Weitere Fusionskonzepte sind inzwischen hinzugekommen. An der National Ignition Facility (NIF), einer gigantischen Anlage in Kalifornien, wird ein Brennstoffkügelchen mit 192 Laserstrahlen beschossen. Darüber hinaus existieren neuere, weniger aufwändige Ansätze. In New Mexico arbeiten Forscher der Sandia National Laboratories am MagLIF-Konzept, bei dem ein von einer Röntgenquelle namens »Z Machine« (Foto rechts) erzeugter magnetischer Puls das Brennmaterial in einem kleinen Zylinder komprimiert und verschmilzt; schon 2013 hofft man auf den Break-Even-Point, will also mehr Energie freisetzen, als in die Zündung der Fusion gesteckt wird. Bei Helion Energy in Redmond, Washington, lässt man hingegen zwei extrem beschleunigte Plasmawolken miteinander kollidieren.

RANDY MONTOYA, SANDIA NATIONAL LABORATORIES

Während ITER und Co. auf gut untersuchte Physik setzen, betreten diese Firmen allerdings wissenschaftliches Neuland; zudem ist ein gelungenes Fusionsexperiment noch lange kein Kraftwerk. Andererseits: Einem Durchbruch bei alternativen Konzepten hätten Tokamaks und Stellaratoren wenig entgegenzusetzen – jedenfalls nicht vor 2050.

die Lebensdauer einer thermisch arbeitenden Maschine beträchtlich. Sie hoffen deshalb, auch den Tokamak auf eine Art Dauerbetrieb umstellen zu können. Dazu könnten sie das Plasma, nachdem der Strom induktiv hochgefahren wurde, wie beim Stellarator durch elektromagnetische Wellen oder schnelle Teilchen erhitzen.

Weil die Fusionsforscher noch viele solcher Stolpersteine aus dem Weg räumen müssen, kann heute niemand sagen, ob und wann es gelingt, mit Kernfusion jemals wirtschaftlich Strom zu erzeugen. Die aktuellen Prognosen werden jedenfalls gern mit Häme überzogen. Vor gut 40 Jahren schätzten Fusionsforscher, dass sie die Sache in etwa 40 Jahren im Griff hätten. An der angepeilten Zeitspanne hat sich bis heute nichts geändert: Offensichtlich haben die Wissenschaftler ihr Können über- oder die zu bewältigenden Schwierigkeiten unterschätzt.

Überdies wird sich mit Macht die Kostenfrage stellen, auch wenn jegliche Kalkulation bislang mit großen Unsicherheiten behaftet ist. Sicher scheint, dass Fusionsstrom teurer wird als Kohlestrom. Die Fusionskraftwerke werden technisch aufwändiger als Kernkraftwerke und unter Umständen doppelt so teuer. Allein der ITER kostet mit gut 15 Milliarden Euro etwa dreimal so viel wie ursprünglich geschätzt und wird selbst im Erfolgsfall noch keinen Strom ins Netz speisen. Bis es so weit ist, werden die beteiligten Länder noch mindestens 80 Milliarden Euro investieren müssen, wie das Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag kalkuliert.

Welchen Anteil die Kernfusion im globalen Energiemix künftig für sich verbuchen kann, ist ebenso unklar. Fachleute beziffern ihn grob mit 10 bis 30 Prozent. Das ist etwa so viel, wie heute die Kernkraft liefert. Ob sich Schwellen- oder Entwicklungsländer diese komplexe Technologie in absehbarer Zeit überhaupt leisten können, steht in den Sternen. Und in den Industrienationen ist in den kommenden Jahrzehnten nicht mit drastischen Steigerungsraten beim Energiebedarf zu rechnen. Angesichts dieser Perspektiven fragen sich deswegen mittlerweile viele, ob die Fusion überhaupt noch zeitgemäß ist. ~

DER AUTOR

Gerhard Samulat ist Diplomphysiker und arbeitet als freier Wissenschaftsjournalist in Wiesbaden. Für seinen Beitrag »Frische Brise« in SdW 2/2012 wurde er mit dem UMSICHT-Wissenschaftspreis des Fraunhofer-Instituts für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik in der Kategorie »Journalismus« ausgezeichnet.

LITERATURTIPPS

Kernfusion – Stand und Perspektiven: Bericht des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik vom September 2011: www.ipp.mpg.de/ippcms/de/pr/publikationen/pdf/fusion_d.pdf
Nüchterne Übersicht mit interessanten Fakten

ITER – Jahresbericht 2011: www.iter.org/doc/all/content/com/Lists/depts_legacy/Attachments/13/annual%20report%202011.pdf
Detailreiche Hochglanzbroschüre

WEBLINKS

www.ipp.mpg.de/ippcms/de/externe_daten/panorama/
Interaktives 360-Grad-Panorama von ASDEX Upgrade

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1168627

Weihnachtliche Reflexionen

Ordnet man spiegelnde Glaskugeln in Tetraederform an, tauchen in den fraktalen Reflexionsmustern unendlich viele »Weihnachtsbäume« auf.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Das Licht treibt sein lachendes Spiel
an der Oberfläche der Dinge.
Gaston Bachelard (1884–1962)

Weihnachtsbäume sind nicht mehr das, was sie einmal waren. Wachs- und Stearinkerzen weichen zunehmend elektrischen Leuchten, Lametta aus schweren Stanniolstreifen ist weit gehend verschwunden, und sogar Baumschmuck aus Kunststoff trifft man an. Nur die guten alten Weihnachtskugeln aus Glas haben allen Trends widerstanden. Was macht den Reiz dieser zerbrechlichen Objekte aus?

Forschen wir ihm nach und stellen uns ein weihnachtlich geschmücktes Zimmer vor. Eine verspiegelte Kugel, so kann man sich leicht überlegen, bildet den gesamten Raum ab – bis auf den kleinen Bereich, den sie selbst verdeckt. In ihrem kleinen Volumen nimmt sie die vielen Lichtquellen im Raum auf und sendet ihr Licht sphärisch konzentriert wieder aus. Wenn es sich dann mit den Reflexionen der anderen Kugeln multipliziert, erwächst den Originallichtern ernsthafte Konkurrenz.

M.C. ESCHER'S »HAND WITH REFLECTING SPHERE«
© 2012 THE M.C. ESCHER COMPANY-HOLLAND. ALL RIGHTS RESERVED. WWW.MCESCHER.COM

Überdies hat der »Rundumblick« der Kugeln eine fast philosophisch zu nennende Konsequenz: Man kann sie nicht betrachten, ohne sich gleichzeitig selbst zu sehen. Der Künstler Maurits Cornelis Escher (1898–1972), der ein ausgeprägtes Gespür für solche Überraschungen und scheinbaren Paradoxien des Alltags hatte, schuf auf diese Weise ein raffiniertes Selbstporträt (unten). Darauf hält er eine verspiegelte Kugel vor sich und betrachtet sein eigenes Konterfei. Fast alles an dieser Lithografie wirkt wie ein Abbild der Wirklichkeit, etwa die sphärischen Verzerrungen des Raums und die gespreizten Finger, die an der Oberfläche der Kugel auf ihre Spiegelungen treffen. Doch was ist mit Escher selbst? Müsste der Künstler auf dieser so entschieden realistischen Darstellung nicht die Zeichenfeder in der Hand halten?

Die Merkwürdigkeit lässt sich noch steigern. Betrachten wir goldgelbe Weihnachtskugeln, die in einem Korb liegen und sich mit filigranen Girlanden zu schmücken scheinen (oben). Doch in Wirklichkeit handelt es sich um »nackte«, undekorierte Kugeln. Jede spiegelt das, was sie von den anderen Kugeln »sieht«, und zeigt es als sphärisch gekrümmter Spiegel verkleinert. Da die gespiegelten Kugeln ihrerseits alle Kugeln in »Sichtweite« reflektieren und deren Bilder gewissermaßen in sich tragen, werden auch diese Reflexe mit reflektiert. Die Angelegenheit erweist sich als selbstbezüglich: Die Kugeln spiegeln ihre Spiegelbilder in den gespiegelten Kugeln, die ebenfalls die gespiegelten Kugeln mit Spiegelbildern spiegeln und so weiter ad infinitum. Solche selbstähnlichen Strukturen werden als Fraktale bezeichnet; in der Natur entdeckt man sie etwa in der Verästelung von Flüssen und ihren Einzugsgebieten oder im Verlauf von Küstenlinien.

Fast alles an dieser Lithografie von Maurits Cornelis Escher wirkt wie ein genaues Abbild der Wirklichkeit. Doch wenn das Bild wirklich eine reale Situation darstellen würde, müsste der Künstler mit der Zeichenfeder in der Hand zu sehen sein.

Weihnachtskugeln mit Girlanden? Der Eindruck täuscht, tatsächlich sind die Kugeln »nackt«. Ihr vermeintlicher gelber Schmuck ist Folge vielfacher Lichtreflexionen, bei denen nichtgelbe Wellenlängen nach und nach absorbiert wurden.

Die Intensität des Girlandengelbs schwankt dabei von fast farblos bis zu einer kräftigen Tönung. Dort, wo sie keine anderen Kugeln spiegelt, erscheint die Oberfläche in der Farbe der hellen weißen Halogenlampe, die sie anleuchtet; ihre goldgelbe Pigment-

farbe wird schlicht überstrahlt. Doch gelbe Pigmente zeichnen sich dadurch aus, dass sie alle anderen Farben in einem gewissen Maß absorbieren. Gelb ist die einzige Farbe, die auch nach vielen Hin- und Herspiegelungen nicht oder zumindest kaum geschluckt wird. Wo andere Kugeln in Sichtweite liegen, entsteht also letzten Endes ein fraktal abgestuftes Gelb, dessen Intensität der Zahl der vorangegangenen Reflexionen entspricht.

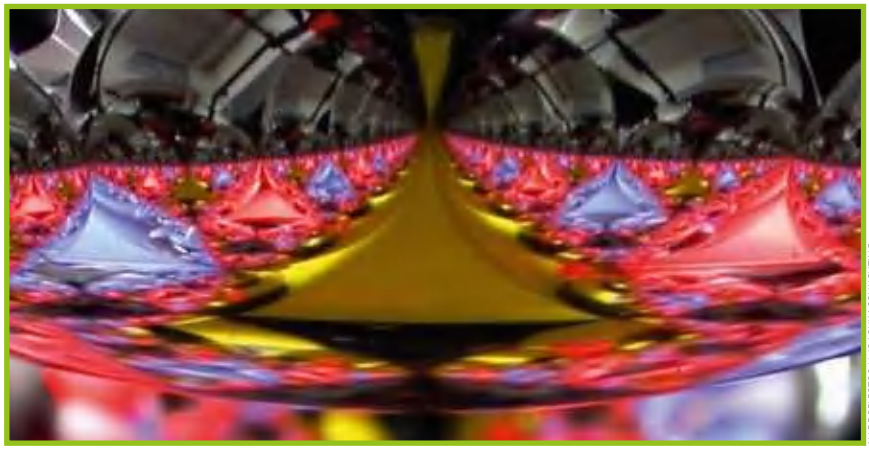
Verringern wir nun die Komplexität des Systems. Dazu ordnen wir vier Kugeln in dichtester Packung an und fixieren den entstandenen regelmäßigen Tetraeder mit Klebeband. Außerdem reduzieren wir die vielen Lichtquellen auf genau eine: einen Laserpointer (Vorsicht: nicht auf die Augen richten!). Nun können wir das Verhalten eines einzelnen Lichtstrahls verfolgen.

Diesen schicken wir in Richtung der Mitte einer uns zugewandten Kugel und lassen ihn dann allmählich seitwärtswandern. Anhand eines weißen Kartons, mit dem wir die reflektierten Strahlen auffangen, können wir überprüfen, dass dicht nebeneinander einfallende Strahlen auch nach ihrer Reflexion weiterhin benachbart verlaufen – ein Kennzeichen der linearen Physik, in der fast gleiche Anfangsbedingungen stets zu fast gleichen Endergebnissen führen. Je weiter der Strahl aber wandert, desto größer ist der Winkel, unter dem er auf die Kugel trifft, und desto weiter entfernt sich der reflektierte Strahl vom einfallenden – bis er schließlich nicht mehr zurückkehrt, sondern zur nächsten Kugel springt. Jetzt schlagen also auch eng benachbarte Strahlen völlig verschiedene Wege ein. Wenn dann noch die dritte oder vierte Kugel vom Hin und Her der Lichtstrahlen erfasst wird, können diese sehr vertrackt werden.

Im Normalfall wird unser Tetraeder allerdings von diffusem Licht beleuchtet; dann sehen wir lediglich ein komplexes Lichtmuster; in der nichtlinearen Physik wird es nach dem Japaner Takeo Wada als Wada-Bassin bezeichnet. Die Wege einzelner Lichtstrahlen darin scheinen unerforschlich – es sei denn, wir bedecken drei der vier Begrenzungsflächen des Tetraeders mit unterschiedlich gefärbten Kartons. Dann fungiert jeder Karton als Lichtquelle, deren Farbe wir im Reflexionsmuster wiederentdecken können. Doch nicht nur das: Plötzlich zeigen sich auch »Weihnachtsbäume« in allen Farben und Größen (oben)!

Wie kommen sie zu Stande? Von jeder Farbfläche aus fällt Licht durch die Lücke zwischen den drei ihr zugewandten Kugeln. Dieses Licht bildet auf der jeweils vierten Kugel die dreieckige Grundstruktur der Weihnachtsbäume. Die drei größten Bäume entstehen, wenn das Licht danach ohne weitere Umwege ins Auge gelangt; Mehrfachreflexionen führen hingegen zu immer kleineren Bäumchen oder lassen größeren Bäumchen »Zweige« wachsen. Weil sich Umgebungslicht in das Muster mischt, ist der Beobachter übrigens ebenfalls Teil des Geschehens, auch wenn das bereits nach zweifacher Reflexion nicht mehr zu erkennen ist.

In dieses fraktale Netzwerk von Weihnachtsbäumen könnten wir immer weiter hineinzoomen und bekämen jedes Mal ein ähnliches Bild zu sehen. In der Praxis stoßen die Zooms allerdings schon nach wenigen Größenordnungen an eine Grenze, denn die Oberfläche der Kugeln ist nicht perfekt. Zum einen absorbieren sie bei jeder Reflexion eben doch einen winzigen Teil des Lichts. Zum anderen ist der Spiegel nicht vollkommen glatt, so dass er das reflektierte Licht nach einigen Reflexionen in unvorhersehbare Richtungen aussendet. In der Theorie jedoch entstehen dort, wo verspiegelte Kugeln aneinandergrenzen, selbstähnliche Muster unendlicher Tiefe.



ALLE DREI FOTOS: H. JOACHIM SCHLICHTING

Man setze vier Weihnachtsbaumkugeln zu einem pyramidenförmigen Tetraeder zusammen und begrenze drei seiner vier Seiten durch Kartons verschiedener Farbe (Bild rechts). Dann sieht man, wie jeder Karton die Lücke zwischen den drei ihm zugewandten Kugeln als »Weihnachtsbaum« (oben, Bildausschnitt) auf die jeweils vierte Kugel projiziert. Weitere Spiegelungen lassen ein fraktales Muster entstehen.

DER AUTOR

H. Joachim Schlichting war bis 2011 Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. 2008 erhielt er für seine didaktischen Konzepte den Pohl-Preis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1168628

ARCHÄOMETALLURGIE

Goldene Zeiten am Limes

Bronzestatuen von Kaisern und Göttern signalisierten Roms Macht auch am Rand des Imperiums. Die Überreste dieser Zeugnisse antiken Kunsthandwerks werden seit Kurzem untersucht. Dabei überrascht die Forscher vor allem die Vielfalt der eingesetzten Vergoldungstechniken.

Von Kati Bott, Frank Willer und Susanne Willer

»Der höchste Lohn des Kaisers sind die Lobpreisungen, sein überall vorhandener Ruf, die Anbetung, die ihm für seine Wohltaten zuteilwird; die Statuen und Tempel und heiligen Bezirke, die er bekommt, sind sein Lohn für seine Sorge und seine Voraussicht.« (*Lukian, Apologie 13*)

Wo Rom herrschte, waren weder seine Kaiser noch seine Gottheiten fern: Auf den Foren der Städte wie in den Militärlagern zeigten bronzene Statuen des Herrschers und seiner Familie eindrucksvoll, wer im Reich das Sagen hatte. Zahlreiche Götterbildnisse schmückten die Tempel und Heiligtümer, manche als Kultbild errichtet, andere als Votivgaben gestiftet – zu Ehren der Gottheit und als Dank für erbetene Hilfe.

Auch die Kastelle und zivilen Siedlungen nördlich der Alpen machten da offenbar keine Ausnahme. Mehr als 4000 bronzene Fragmente legen davon ein beredtes Zeugnis ab, ausgegraben in einem Gebiet, das von der Schweiz über Deutschland bis in die Niederlande reicht (siehe Karte S. 72).

AUF EINEN BLICK

EIN PUZZLE AUS 4000 TEILEN

1 Die **Kunst des Bronzegusses** war im Römischen Reich hoch entwickelt. Lebens- bis überlebensgroße Kaiserstandbilder und Götterstatuen wurden sogar in Serie gefertigt – doch nur wenige Exemplare haben die Zeiten überdauert.

2 Mehr als 4000 Fragmente solcher Großbronzen vom Limes beziehungsweise dem Limeshinterland werden derzeit systematisch erfasst und untersucht. Neben kulturgeschichtlichen Fragen gehen die Forscher auch **Fragen der Herstellungstechnik** nach.

3 Einige Statuen waren vergoldet. Neben der **Blattvergoldung** lässt sich in Einzelfällen der Einsatz von **Feuer-** oder **Diffusionsvergoldung** nachweisen, obwohl die verwendeten Bronzelegierungen dafür nicht geeignet waren. Doch bereits mit damaligen Mitteln ließ sich das Problem lösen, wie Experimente zeigen.

Oft wenig ansehnlich, lagerten sie unbeachtet in gut 90 Museen und Archiven: die Überbleibsel kunstvoller Großbronzen. Als marodierende Germanen im 3. Jahrhundert die Nordwestprovinzen Roms heimsuchten, wurden viele Bronzen erbeutet und zerschlagen, andere von Römern selbst als Altmetall wiederverwertet. Mitunter galt es aber auch, die »damnatio memoriae« umzusetzen, die der römische Senat über einen in Ungnade gefallenen Kaiser verhängt hatte: Inschriften, die an ihn erinnerten, wurden getilgt und seine Bildnisse zerstört – ein heute noch praktiziertes Verfahren, um das Gedenken an einen verhassten Machthaber auszulöschen. Zu den römischen »Opfern« dieser Praxis zählten unter anderen Caligula, Nero oder auch Alexander Severus.

Seit 2010 untersuchen Archäologen, Restauratoren und Naturwissenschaftler »Römische Großbronzen am UNESCO-Welterbe Limes«, so der Name des Projekts. Es weist weit über sein Untersuchungsgebiet hinaus, denn auch andernorts haben Großbronzen die Antike nur selten überdauert – zu wertvoll war das Metall. Das Reiterstandbild des Kaisers Marc Aurel (siehe Bild rechts) ist ein seltener Glücksfall: Es galt im Mittelalter als Abbild Konstantins des Großen, des Förderers christlicher Religion, und entging dem Einschmelzen.

Sämtliche Teilstücke aus dem Limesgebiet und seinem Hinterland werden nun dokumentiert und in einer Onlinedatenbank erfasst. Sie stammen von mehr als 120 Fundplätzen. Etwa 150 Fragmente ließen sich bislang Götterbildnissen zuordnen, der große Rest gehört mutmaßlich zu Kaiserdarstellungen. Neben der Rekonstruktion der Statuen sollen auch deren Aufstellungsorte, Funktionen und Auftraggeber ermittelt werden. Außerdem wollen die Forscher neue Einsichten in die antiken Fertigungstechniken bis hin zur Lokalisierung und Organisation der Werkstätten gewinnen. Dazu kooperieren das Archäologische Landesmuseum Baden-Württemberg (ALM), das Institut für Archäologische Wissenschaften der Goethe-Universität Frankfurt und das LVR-LandesMuseum Bonn, unterstützt durch eine große Anzahl von Projektpartnern an Museen, Universitäten und spezialisierten Forschungsinstituten.

Reste bronzener Kaiserbilder konnten in beinahe jedem Limeskastell nachgewiesen werden. Noch erhaltene Sockel verraten: Diese Bildnisse standen in den Höfen der Stabsgebäude, nicht in Tempeln. Sie sollten ihn demnach ehren, hatten also keine Funktion im Kaiserkult und entsprachen damit den von der Bevölkerung gestifteten Kaiserstatuen auf den Foren der Städte. Ehrenstatuen in den Militärlagern gaben die jeweiligen Einheiten beziehungsweise deren Offiziere in Auftrag. Sie symbolisierten Treue und Loyalität gegenüber dem Herrscher als Oberbefehlshaber der Armee. Möglicher Anlass einer Errichtung konnte ein Festtag sein wie die Erneuerung des Treueeids an den Kaiser an jedem 3. Januar, aber auch ein Besuch des Herrschers. Als Caracalla im Jahr 213 die Heerlager am Limes inspizierte, wurden wohl nicht nur Straßen erneuert und Ehrenbögen gebaut, wie es überliefert ist – auch Bronzegießer hatten vermutlich alle Hände voll zu tun.

Deren Geschick äußerte sich nicht allein in der Gestaltung und Formung der lebensgroßen, manchmal noch größeren Figuren, die aus Einzelteilen aufgebaut wurden; daher sind die eingesetzten Guss- und Fügetechniken ebenfalls ein Thema des Forschungsprojekts. Zudem erwiesen sich die Handwerker am Rand der römischen Welt auch in der Vergoldung als Meister ihrer Kunst.

Die ältesten bekannten Zeugnisse derart aufgewerteter Statuen stammen aus dem Rom des 2. Jahrhunderts v. Chr. Gold galt in der Antike als Symbol der Unsterblichkeit und unterstrich damit, dass der Dargestellte nicht der menschlichen Sphäre angehörte. Zudem war eine Vergoldung – ebenso wie Einlagen verschiedenfarbiger Metalle – ein künstlerisches Mittel, um ein Standbild lebendiger wirken zu lassen.

Das galt auch am Limes: Gut 500 der mehr als 4000 untersuchten Frag-

Dieses Reiterstandbild wurde Marc Aurel (hier die Kopie auf dem Kapitolsplatz in Rom) vielleicht 166 n. Chr. anlässlich seines Sieges über die Parther gestiftet. Es gehört zu den wenigen vollständig erhaltenen Großbronzen.

MARIE-LAN NGUYEN / PUBLIC DOMAIN [M]

mente weisen Reste einer Vergoldung auf. Einige davon lassen sich sehr genau nach Form und Bildsprache den Körperpartien bestimmter Statuentypen zuordnen. Weil in keinem Fall Übergänge vom Gold zu unvergoldeten Partien zu erkennen sind, gehen die Forscher von einer vollständigen Vergoldung aus.

An einer Auswahl von 22 Stücken erlaubten die Eigentümer die Entnahme von Proben. Diese wurde jeweils angeschliffen und am Curt-Engelhorn-Zentrum für Archäometrie in Mannheim mit einem Rasterelektronenmikroskop untersucht. Bei 17 Stücken hatten sich die Bronzehandwerker offenbar der Blattvergoldung bedient, einer noch heute gebräuchlichen und besonders einfachen Vorgehensweise: Ein Anstrich mit Öl, Harz, Wachs oder Eiweiß lässt eine hauchdünne Goldfolie allein auf Grund der Adhäsionskräfte haften und verklebt sie zudem mit der Oberfläche. Anschließend wird sie poliert, um Falten und Übergänge zwischen den einzelnen Goldblättern auszugleichen. So entsteht nach und nach eine geschlossene Schicht. Deren Dauerhaftigkeit hängt von der akkuraten Ausführung und der Klebekraft des Anlegemittels ab. Damals wie heute gilt: Unachtsame Handhabung einer so vergoldeten Statue haben leicht Kratzer und Abrieb zur Folge.

Das gilt auch für die Or-haché-Technik (nach französisch: »or« für Gold und »hacher« für hacken), die antike Schriftquellen für römische Provinzen nördlich der Alpen erwähnen. Diese Technik basiert auf einer rein mechanischen Verbindung ohne Klebemittel. Dazu wurde die Bronze aufgeraut und auf mindestens 70 Grad Celsius erhitzt, was sie auf Grund von Oxidationsprozessen farbig anlaufen ließ. Anschließend wurde Blattgold regelrecht in die raue Oberfläche hineinpoliert, und das weiche Edelmetall verzahnte sich mit der Bronze. Der Anlaufton aber schimmerte durch, was die Statue natürlicher wirken ließ. Leider lässt sich diese Technik heute kaum nachweisen, denn im mikroskopischen Anschliffbild sieht eine Jahrhunderte im Boden gelagerte, korrodierte Bronze nicht anders aus als eine, die durch Hitze oxidiert ist. An einem Fragment einer Jupiterstatue aus Mainz ist es kürzlich gelungen: Die Riefen der aufgerauten Bronze hatten sich in der Folie durchgedrückt. Ein Beispiel für ein mutmaßlich im Or-haché-Verfahren vergoldetes Reiterstandbild ist die des Kaisers Marc Aurel.

Problematische Feuervergoldung

Die dritte in der Antike gut bekannte Technik war die Feuervergoldung. Mit einem Pinsel trug der Handwerker zunächst eine breiige Legierung aus Gold und Quecksilber auf. Danach erhitzte er das Stück, allerdings nicht über offenem Feuer, wie der Name suggeriert, sondern vermutlich über glühender Holzkohle. Das Quecksilber verdampfte nun weit gehend, diffundierte aber auch teilweise in die Bronze hinein

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK, NACH: SASCHA HECKMANN & CLAUDIA SARGE, UNIVERSITÄT FRANKFURT

Wo Rom seine Herrschaft errichtet hatte, durften die Symbole von Macht und Reichtum nicht fehlen. Mehr als 4000 bronzene Statuenfragmente von gut 120 Fundplätzen von der Schweiz bis zu den Niederlanden geben davon Zeugnis.

ARCHÄOLOGISCHES LANDESMUSEUM BADEN-WÜRTTEMBERG

Kaiser oder Gott? Aus Tausenden von Teilen die ursprünglichen Standbilder zumindest annähernd wieder zusammenzusetzen, dürfte selbst Puzzlemeister überfordern (im Bild eine Auswahl der über 1000 Fragmente, die im Kastell Aalen ausgegraben wurden).

und nahm dabei sozusagen Goldatome mit. Anschließend wurde die noch raue Beschichtung auf Hochglanz poliert. Tatsächlich lässt sich diese Methode anhand von Quecksilberspuren an einem Armfragment aus dem Bestand des Akademischen Kunstmuseums Bonn (siehe Bild S. 74 oben) sowie einem Statuenfragment aus Dorsten analytisch nachweisen. Das Rasterelektronenmikroskop zeigt im Anschliffbild nun nicht mehr getrennte Metallschichten wie bei der Blattvergoldung und dem Or-haché-Verfahren, sondern eine diffuse Übergangszone (siehe Bilder S. 75).

Zwar verbrauchte die Feuervergoldung mehr Edelmetall, doch die resultierende Oberfläche vertrug Reibung oder Stößen dank der festeren Verbindung der Metalle weit besser. Für große Statuen war sie aber dennoch kaum gebräuchlich, und das aus gutem Grund: Etwa ab dem 1. Jahrhundert v. Chr. gaben römische Bronzegießer der Legierung im Lauf der Zeit bis zu 30 Prozent Blei zu. Das erlaubte den Guss dünnwandiger Statuen, sparte damit teures Kupfer und Zinn und ermöglichte die Herstellung von Serien. Zudem waren bleihaltige Bronzen weniger zäh, Verzierungen ließen sich daher am erkalteten Metall leichter herausmeißeln. Für die Feuervergoldung aber taugte das Material nicht, weil dabei eine fleckige, graue Oberfläche entstand. Der Schmelzpunkt von Blei liegt nämlich weit unter dem einer Kupfer-Zinn-Legierung – das Schwermetall reagiert deshalb als Erstes mit der Goldlegierung. Eine Blattgoldreparatur bei dem erwähnten Oberarmfragment (siehe Bild S. 75, Mitte) sollte möglicherweise eine solche hässliche Stelle kaschieren.

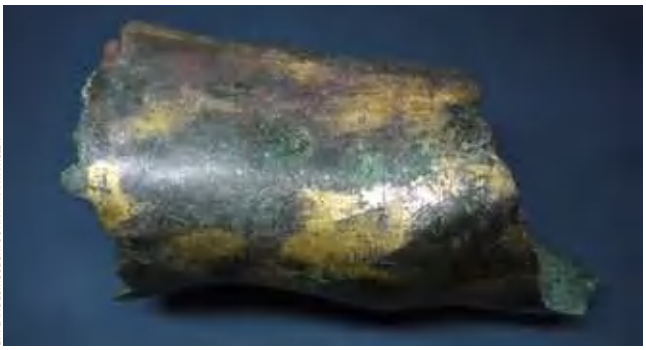
Eine Überraschung bot ein großes Fragment aus dem Rücken einer männlichen Statue, deren offenkundige Nacktheit dafür spricht, dass es sich um eine Gottheit wie Jupiter, Mars oder Merkur gehandelt haben dürfte. Das Stück war gemeinsam mit anderen in einer alamannischen Siedlung aus dem 3. bis 5. Jahrhundert vergraben worden; eventuell sollte auf diese Weise Raubgut aus römischen Militärlagern vor dem Zugriff Dritter geschützt werden. 1998 kam dieses Metalldepot bei Ausgrabungen des Hessischen Landesamts für Denkmalpflege in der Nähe von Groß-Gerau zum Vorschein.

Das Rasterelektronenmikroskop enthüllte eine verwaschen wirkende Übergangszone der Vergoldungsschicht mit der Bronze, wie sie typisch für eine Verbindung ist, die durch Diffusion der verschiedenen Metalle in das jeweils andere Metallgitter entsteht. Tatsächlich ist eine solche Technik aus römischer Zeit bekannt, doch nach bisherigem Wissen diente sie vorwiegend der Veredelung von Silberoberflächen. Wie bei dieser wurde dabei das Grundmetall zunächst leicht angeschliffen, dann eine Goldfolie mit einem Stein daraufpoliert und so eine erste mechanische Verbindung erzielt. Daran schloss sich eine Phase der Erwärmung an, um den Austausch von Metallatomen zu fördern.

Antike Vergoldungstechniken im Experiment

Wie beim Silber, so funktionierte diese Technik wohl auch bei Bronzelegierungen. Dabei entstanden neben diffusen Zonen, in denen Gold in die Bronze und Kupfer aus der Bronze in das Gold wanderten, regelrechte Diffusionsfinger: Das Rasterelektronenmikroskop zeigt Goldzonen, die fingerartig weit in das Gefüge des Grundmetalls hineinragen. Gegenüber der Blattvergoldung und der Or-haché-Technik ergab sich also nicht nur eine physikalisch-mechanische, sondern zudem eine chemische Verbindung.

Dass diese Diffusionsvergoldung auch bei Bronzen eingesetzt wurde, überrascht dennoch. Denn zum einen neigt der Legierungsbestandteil Kupfer oberhalb von etwa 70 Grad Celsius zur Oxidation. Da Kupferoxid sich nicht wie ein Metall verhält, steht es zum anderen für den gewünschten Austausch mit dem Gold nicht mehr zur Verfügung. Am



LVR-LANDESMUSEUM BONN / FRANK WILLER

Spuren von Quecksilber an diesem Oberarmfragment verraten, dass diese Statue feuervergoldet wurde. Das Anschliffbild (rechte Seite, mittleres Bild) offenbart zudem eine Blattgoldreparatur.

LVR-LandesMuseum Bonn wurden deshalb die Möglichkeiten der antiken Handwerker Schritt für Schritt an eigens nach damaliger Zusammensetzung hergestellten Bronzeplättchen überprüft. Es zeigte sich, dass es möglich war, mit einer Schicht aus Holzkohlepulver und Olivenöl die Zufuhr von Luftsauerstoff und somit die Oxidation während der Wärmephase zu unterbinden. Danach folgte ein weiteres Polieren der Goldschicht. Diese Kombination von Temperatur unter reduzierenden Bedingungen mit anschließender Druckpolitur lieferte im Anschliff Ergebnisse, die mit dem Originalbefund aus Groß-Gerau vergleichbar sind.

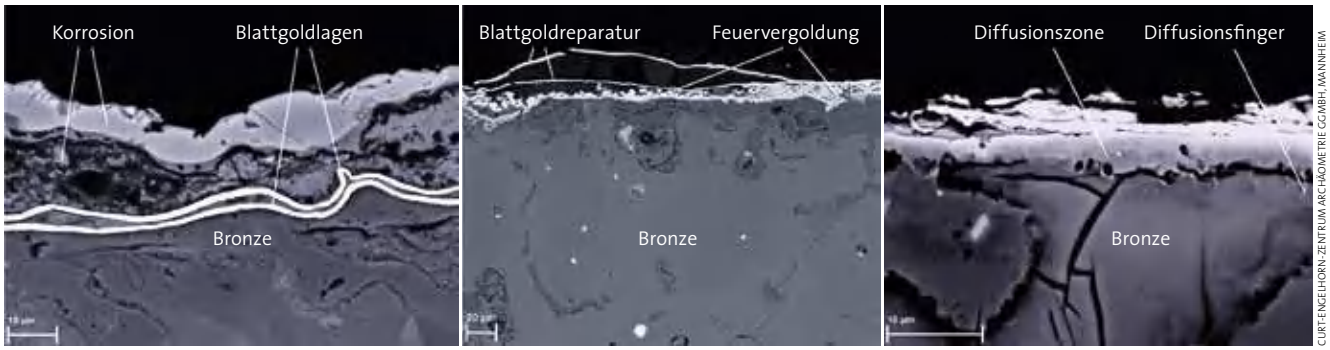
Ein Rätsel aber blieb: Es fehlten die von der Feuervergoldung bekannten – und unerwünschten – Zeichen einer Reaktion mit dem Blei, obwohl das im Inneren des Bruchstücks nachgewiesen wurde. Für die Limesregion im 2. bis 3. Jahrhundert n. Chr. wurde daher im Rahmen des Projekts die Zusammensetzung von 200 Proben bestimmt; weitere 300 sollen folgen. Im Durchschnitt enthielt die Bronze demnach 22 Prozent Blei, abweichende Rezepturen wurden ebenfalls getestet. Entsprechend dem Originalfund erfolgte der Auftrag einer Goldfolie von drei Mikrometer Stärke mit einem Polierstein (zum Vergleich: Heutiges Blattgold ist 0,125 Mikrometer dick). Geschah das auf einer glatten Oberfläche, haftete sie kaum, auf aufgerautem Grund hingegen ergab sich die erwartete mikroskopisch feine, mechanische Verzahnung. Die Proben wurden in mehrere Einheiten geteilt, bei unterschiedlichen Temperaturen von 100 bis 450 Grad Celsius, unter oxidierenden sowie unter reduzierenden Bedingungen erhitzt und dann in heißem Zustand erneut poliert.

Das der Legierung zugegebene Blei wird nicht in das Metallgitter eingebaut, sondern bildet feine, gleichmäßig verteilte Tröpfchen. Bereits oberhalb von 150 bis 200 Grad Celsius beginnen sich diese mit dem Gold zu verbinden, und an der Oberfläche entstand daher der unerwünschte silbergraue Schleier. Je höher die Temperatur war und je mehr Luftsauerstoff an das Material gelangte, desto eher neigte das Kupfer zur Oxidation. Nur an Proben mit geringen Bleigehalten und bei Erhitzen unter Sauerstoffabschluss zeigte das Rasterelektronenmikroskop schließlich Übergangszonen mit Diffusionsfingern.

Weitere Versuche ergaben, dass Diffusion an bleihaltiger Bronze durchaus möglich ist, weil das störende Metall nicht direkt in das Legierungsgitter eingebaut ist, sondern in Form winziger Einschlüsse vorliegt. Gelingt es, solche Tröpfchen nahe der Oberfläche – also in ein bis fünf Mikrometer Tiefe – zu entfernen, kann der unschöne Schleier nicht entstehen. Eher zufällig kam heraus, dass es genügt, die Bronze zu erhitzen und in Wasser abzulöschen. Dann oxidiert ein Teil des oberflächennahen Bleis, und die Einschlüsse lassen sich mit Bimsstein und Wasser abreiben. Restliche Tröpfchen können

LINKS: LVR-LANDESMUSEUM BONN / JÜRGEN VOGEL; RECHTS: LVR-LANDESMUSEUM BONN / FRANK WILLER

Alamannen hatten vor mehr als 1500 Jahren Metallstücke aus römischen Statuen beim heutigen Groß-Gerau versteckt. Restauratoren befreiten die Teile im Labor des LVR-LandesMuseums Bonn von den Korrosionsschichten (unten). Besonders die Vergoldung des großen Rückenfragments (links außen) gibt Rätsel auf.



CURT-ENGELHORN-ZENTRUM ARCHÄOMETRIE GGMBH, MANNHEIM

Das Rasterelektronenmikroskop bringt es ans Licht: Im Anschliff der Metallproben können Experten die verschiedenen Vergoldungstechniken unterscheiden. So bleibt nur aufpoliertes Blattgold sauber von der Bronze getrennt (links), während bei der Feuer- und der Diffusionsvergoldung (Mitte und rechts) Übergangszonen entstehen.

mit Zitronensäure ebenfalls oxidiert und dann mechanisch entfernt werden, anschließend wird die Säure mit Wasser neutralisiert und abgespült, dann erneut gebürstet. Ob die römischen Handwerker diese Technik kannten, müssen weitere Untersuchungen ergeben. Zwar zeigt das Mikroskopbild tatsächlich leere Kavernen an Stelle der Bleitröpfchen, doch die könnten auch beim Anschleifen der Probestücke entstanden sein.

Der hohe Aufwand hätte sich jedenfalls gelohnt: Eine Diffusionsvergoldung wäre wesentlich haltbarer als eine Blattvergoldung gewesen, was die Folgekosten einer Pflege verringert hätte. Darüber hinaus gab es sicher gestalterische Gründe. Griechische wie römische Kunsthandwerker veredelten ihre Werke durch künstlich erzeugte Patina. Diese »stabile Korrosion« versiegelte das Metall. Überdies versuchten sie, durch Einlegearbeiten aus andersfarbigen Metallen bestimmte Farbwirkungen zu erzielen oder Kontraste zu unterstreichen. Mit der Diffusionsvergoldung am Originalbefund ließ sich ein rötlich brauner Farbton erreichen, der in der Rückenpartie eines unbekleideten, athletisch anmutenden Oberkörpers naturalistisch wirken mochte – und gleichzeitig beständiger war, als es die Blattvergoldung oder eventuell eine Or-haché-Technik vermochte. Zudem erlaubt die Diffusionsvergoldung eine präzisere Wiedergabe von Oberflächenstrukturen, da im Gegensatz zur Blattvergoldung keine organischen Anlegemittel als Zwischenschicht erforderlich sind.

Andere Fragmente aus dem Metalldepot von Groß-Gerau waren mit hellgelbem Blattgold belegt. Falls sie vom gleichen Beutezug stammten, könnten an dem Ort des Überfalls Statuen gestanden haben, die durch unterschiedliche Vergoldungstechniken verschieden gestaltet worden waren.

Dass das Rückenfragment kein Einzelfall war, darauf deuten inzwischen auch Beispiele aus einem römischen Heiligtum bei Kalkar am Niederrhein und dem spätrömischen Reiterkastell bei Isny im Allgäu hin, die möglicherweise Diffusionszonen in den Anschliffen zeigen – die genaue Untersuchung steht noch aus. Entstand also nördlich der Alpen eine innovative Vergoldungstechnik, die sich aber nicht weiter im Reich verbreitet hat? Das erscheint wenig überzeugend, denn ein Kennzeichen römischer Ökonomie war es, dass lokal oder regional produzierte Waren und Techniken im gesamten Imperium verbreitet wurden. Lässt sich die Diffusionsvergoldung also vielleicht auch an Statuen aus anderen Provinzen beziehungsweise aus dem italischen Kernland nachweisen? Wenn die Ergebnisse des Projekts ab März 2014 in einer Ausstellung im LVR-LandesMuseum Bonn vorgestellt werden, hoffen die Forscher, auch diese Frage beantworten zu können.

DIE AUTOREN

Kati Bott (links) ist als archäologische Restauratorin im Landesamt für Denkmalpflege in Stuttgart tätig; sie hat im Rahmen ihrer Diplomarbeit am Projekt mitgearbeitet. **Frank Willer** (Mitte) ist archäologischer Restaurator am LVR-LandesMuseum Bonn. Er leitet die archäometrischen und herstellungstechnischen Untersuchungen innerhalb des Forschungsprojekts. Die promovierte Archäologin **Susanne Willer** ist wissenschaftliche Referentin für Provinzialrömische Archäologie im LVR-LandesMuseum Bonn und Mitglied der Projektleitung. »Römische Großbronzen am UNESCO-Welterbe Limes« wird im Rahmen der Förderinitiative »Forschung in Museen« von der VolkswagenStiftung finanziert.

QUELLEN

Drayman-Weisser, T. (Hg.): Gilded Metals, History, Technology and Conservation. Archetype Publications, London 2000
Kemkes, M., Sarge, C.: Gesichter der Macht. Kaiserbilder in Rom und am Limes. Konrad Theiss, Stuttgart 2009
Lahusen, G., Formigli, E.: Römische Bildnisse aus Bronze-Kunst und Technik. Hirmer, München 2001
Lahusen, G.: Römische Bildnisse. Auftraggeber. Funktion. Standorte. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 2010

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1168630**

ESSAY

Die Vermessung des Glücks

Ökonomen suchen nach einem neuen Verständnis von Lebensqualität und Wohlstand. Sie überraschen dabei mit neuen Einsichten, die aber mit Vorsicht interpretiert werden sollten.

Von Joachim Weimann, Ronnie Schöb und Andreas Knabe

Ökonomen haben eine ganz spezielle Sicht auf den Menschen. Sie unterstellen, dass wir uns in allererster Linie um uns selbst sowie unsere nahen Verwandten kümmern, dass wir dabei überwiegend rational vorgehen und fast ausschließlich an einer möglichst guten Versorgung mit materiellen Gütern interessiert sind. In der radikalsten Variante entsteht so als Produkt mathematischer Idealisierung der Homo oeconomicus – ein seelenloser Geselle, der konsequent rational und rücksichtslos nur sein eigenes materielles Wohlergehen im Auge hat.

Auf Menschen dieses Typus beruhen mindestens 90 Prozent aller wirtschaftswissenschaftlichen Modelle. Ökonomen benutzen sie weltweit, um Märkte zu analysieren oder der Frage nachzugehen, wie Gesellschaften zu gestalten sind, um ihre knappen Ressourcen effizienter zu nutzen. Trotz der Idealisierung sind diese Modelle gleichwohl hilfreich. Immerhin können sie viele reale Phänomene erstaunlich gut erklären; zudem zeigt sich, dass die Annahme, Menschen verhielten sich vor allem eigennützig, doch relativ weit trägt.

Dennoch ist das ökonomische Verhaltensmodell (fachlich: »Rationalmodell«) aus zwei Richtungen unter Beschuss geraten. Zum einen fand die experimentelle Verhaltensökonomie heraus, dass sich Menschen im Labor oft nur eingeschränkt rational verhalten:

➤ Sie lassen sich nicht nur vom Eigennutz leiten, sondern auch von altruistischen Motiven.
➤ Sie zeigen Sinn für Fairness, agieren gerne reziprok, also gemäß dem Motto »Wie du mir, so ich dir«.
➤ Sie versuchen meist, allzu große Ungleichheiten zu vermeiden.

Doch wie stark sind die altruistischen Motive wirklich, die Probanden im Labor immer wieder an den Tag legen? In jüngster Zeit häuften sich Berichte von Experimenten, die zeigen, dass Menschen zwar selbstloses Verhalten praktizieren, jedoch offenbar nur in relativ engen Grenzen. Bei wiederholten Interaktionen weicht es schon bald eigennützigem Handeln.

So bekamen in einem simplen, aber aufschlussreichen Versuch Probanden zweimal an einem Tag Geld ausgehändigt, das sie entweder behalten oder einer wohltätigen Organisation spenden konnten. Das Resultat: Hatten die Versuchsteilnehmer vormittags noch mehr als die Hälfte der Mittel gestiftet, war ihre Freigebigkeit nachmittags auf ein Viertel gesunken.

Die zweite Kritik am Rationalmodell erfolgte aus einer ganz anderen Richtung, der Glücksforschung. Bekanntlich entfaltet das Streben aus Eigennutz im Wettbewerb eine massive Dynamik. Das führt dazu, dass sich marktwirtschaftliche Systeme rascher entwickeln als andere Wirtschaftssysteme. In der Folge steigt das Nationaleinkommen genauso wie der Verdienst jedes Einzelnen. Ökonomen sind gewohnt, genau das als Erfolg der Marktwirtschaft anzusehen, denn schließlich verheißen höhere Einkommen mehr Wohlstand, größere Sicherheit sowie steigende Lebensqualität. 1974 erschien jedoch eine empirische Studie von Richard Easterlin, in der sich der 1926 geborene US-Wirtschaftswissenschaftler mit dem Zusammenhang von Geld und Glück befasste. Seine Resultate sollten die marktwirtschaftliche Standardvorstellung auf den Kopf stellen.

Easterlin wertete Interviews aus, in denen die Befragten von ihrer subjektiven Lebenszufriedenheit berichteten. Insbesondere wollte er von ihnen wissen, ob und wie sich diese im Lauf der Zeit verändert hatte. Überwiegend zeigte sich dabei zwar, dass es reicheren Menschen tatsächlich besser geht als ärmeren. Aber der Forscher stellte auch fest, dass dies jeweils nur zu einem bestimmten Zeitpunkt gilt. Die durch-

AUF EINEN BLICK

WIE ZUFRIEDEN SIND WIR?

1 Höhere Einkommen verheißen mehr **Wohlstand und Glück**. Doch fühlen sich Menschen auch zufriedener und glücklicher, wenn sie reicher werden?

2 Die **ökonomische Glücksforschung** hat die These aufgestellt, dass Geld und Glück keineswegs miteinander wachsen. Vielmehr postulierte der US-Ökonom Richard Easterlin, dass wir zwar immer reicher, aber nicht entsprechend glücklicher werden.

3 Neuere Studien stellen Easterlins These in Frage. So zeigt sich, dass die Vergleiche zwischen unterschiedlichen Zeitpunkten kaum möglich sind, weil sich die **Bezugspunkte** verschieben, an denen wir uns orientieren.

schnittliche Lebenszufriedenheit veränderte sich dagegen innerhalb der untersuchten Zeitspanne nicht – trotz permanent steigender Einkommen. Offenbar gilt: Wir werden also zwar immer reicher, fühlen uns aber deshalb nicht besser.

Dieser Befund ist als das »Easterlin-Paradoxon« in die Literatur eingegangen. Lange kümmerten sich die Wissenschaftler kaum um diesen Befund, doch in den letzten 15 Jahren entwickelte sich darum ein regelrechter Boom. Die Forscher erfassen dabei die subjektive Lebenszufriedenheit ausgewählter Personen in Interviews. Darin bitten sie die Befragten, ihr Leben einzuschätzen, und zwar auf einer Skala von 0 (»vollkommen unzufrieden«) bis 10 (»vollkommen zufrieden«). In Deutschland geschieht dies im Rahmen des Sozio-oekonomischen Panels (SOEP), bei dem jedes Jahr die gleichen mehr als 20 000 Haushalte befragt werden.

Falls das Easterlin-Paradoxon tatsächlich zuträfe, könnte es eigentlich nur eine mögliche Erklärung dafür geben: Für unser Wohlbefinden spielt nicht das absolute Einkommen eine Rolle (das in den letzten 150 Jahren durchweg gestiegen ist), sondern unsere relative Position auf der Einkommensskala.

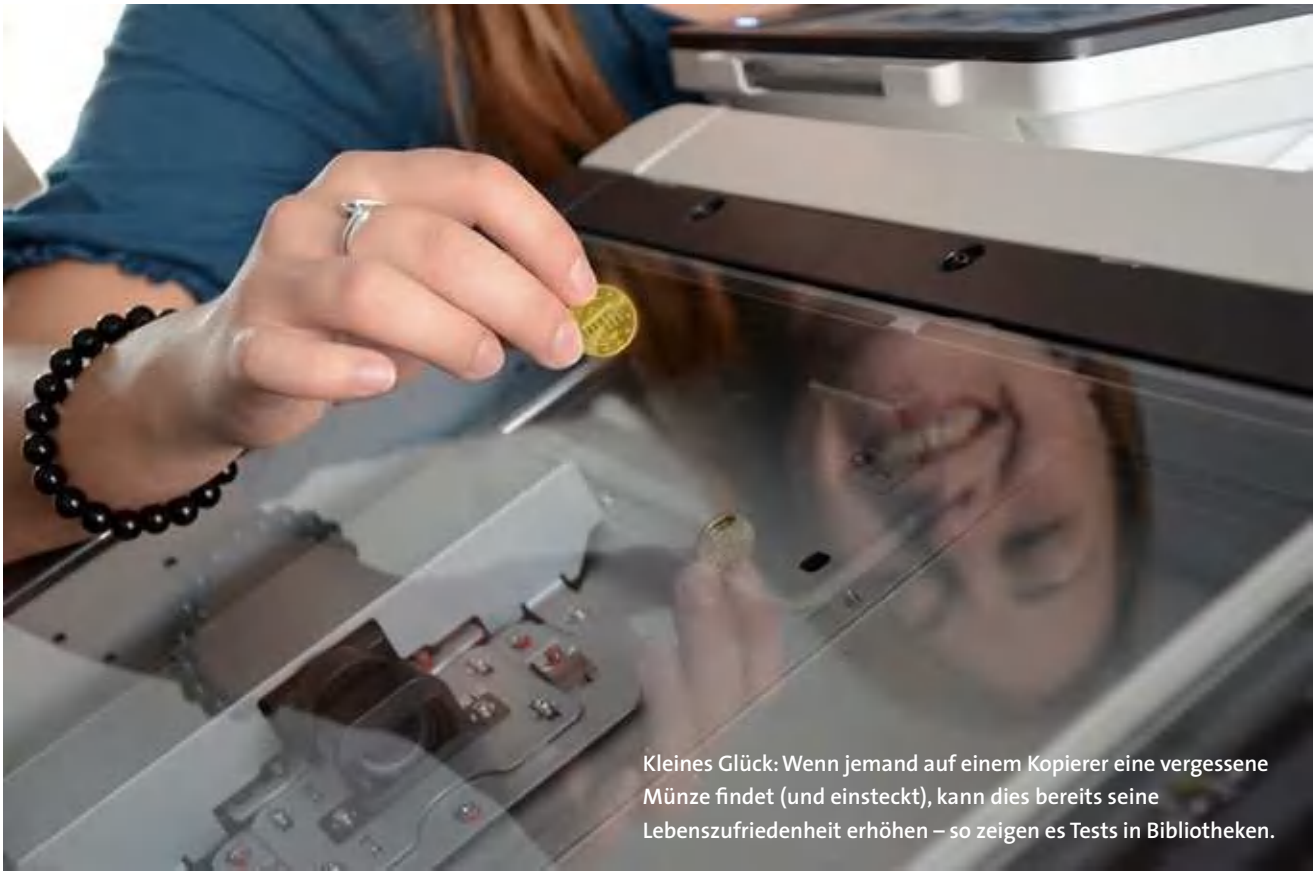
Diese Positionen verschieben sich aber im Schnitt kaum: Steigt jemand in der Hierarchie auf, muss dafür ein anderer absteigen. So wie es beim 100-Meter-Lauf nicht möglich ist, dass sich jemand verbessert (zum Beispiel von Platz 3 auf 2), ohne dass ein anderer sich verschlechtert (von Platz 2 auf 3), kann es auch in der Einkommenshierarchie nicht nur Gewinner geben. Um sich das zu verdeutlichen, versetzen Sie sich in folgende Situation: Ihr Chef ruft Sie zu sich und eröffnet Ihnen, dass Sie ab jetzt fünf Prozent mehr Gehalt bekommen, weil Sie so hervorragende Arbeit geleistet haben. Wie wird es Ihnen danach gehen? Vermutlich werden Sie bestens gelaunt und mit Ihrem Leben zufrieden aus dem Büro des Chefs kommen. Doch zufällig begegnen Sie kurz darauf im Flur einem Kollegen. Der sieht Sie strahlen und fragt freundlich: »Na, auch beim Chef gewesen? Bekommst du jetzt gleichfalls zehn Prozent mehr?« Was wäre dann mit Ihrer Lebenszufriedenheit?

Befreiung aus dem hedonistischen Hamsterrad?

Wenn aber ein anstrengender und Ressourcen verzehrender Wettbewerb für die Gruppe als Ganzes keinen oder nur geringen Gewinn bringen kann, drängt sich der Schluss auf, es wäre sinnvoll, diesen Wettbewerb drastisch einzudämmen. Sollte das Easterlin-Paradoxon unsere gesellschaftliche Realität zutreffend beschreiben, hätte das demnach weit reichende Folgen. Beispielsweise sollte dann der Staat die Erträge des Wettbewerbs um relativ bessere Positionen hoch besteuern – also unser Einkommen. Das sollte uns dann die Lust an dem »sinnlosen Streben« nehmen und uns aus dem hedonistischen Hamsterrad befreien, in das wir durch unser Eigennutzstreben geraten sind.

Fast alles, was Ökonomen positiv bewerten und befürworten, würde das Easterlin-Paradoxon ins Gegenteil verwandeln: Wettbewerb wäre schädlich, Wirtschaftswachstum sinnlos, staatliche Eingriffe in die private Lebensführung wä-

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / CLAUS SCHÄFER



Kleines Glück: Wenn jemand auf einem Kopierer eine vergessene Münze findet (und einsteckt), kann dies bereits seine Lebenszufriedenheit erhöhen – so zeigen es Tests in Bibliotheken.

ren notwendig und gerechtfertigt. Denn schließlich wären Menschen allein gar nicht in der Lage, ein Leben zu führen, das sie glücklich macht. Jedem liberal gesinnten Menschen und fast allen Ökonomen dürfte bei dieser Vorstellung ein kalter Schauer über den Rücken laufen.

Es ist das unbestrittene Verdienst der frühen Glücksforschung um Easterlin, darauf hingewiesen zu haben, wie bedeutsam relative soziale und ökonomische Positionen in der Gesellschaft sind. Aber gilt das Easterlin-Paradoxon wirklich – ist immer nur der Vergleich mit anderen relevant? Lassen sich allein auf Basis der bisher erhobenen Lebenszufriedenheitsdaten solch weit reichende Schlussfolgerungen ableiten? Möglicherweise nicht! Denn in den letzten fünf Jahren sind mehrere neue Studien erschienen, die das Easterlin-Paradoxon nachhaltig in Frage stellen.

Glückserleben nur innerhalb enger Schranken

Unbestreitbar ist für die Lebenszufriedenheit die relative Position, in der wir uns befinden, von hoher Bedeutung. Dafür gibt es auch eine durchaus überzeugende Erklärung: Die US-Wirtschaftsforscher Luis Rayo und Gary S. Becker wiesen 2007 in viel beachteten Arbeiten darauf hin, dass wir schon aus physiologischen Gründen gar keine andere Wahl haben, als uns an Referenzpunkten zu orientieren, die sich in räumlicher oder zeitlicher Nähe befinden. Im Kern sind es laut Rayo und Becker zwei Eigenschaften unseres Nervensystems, die uns dazu nötigen. Einerseits sind wir nur eingeschränkt wahrnehmungsfähig, das heißt, wir können kleine Zuwächse an »Glück« gar nicht registrieren. Andererseits sind unsere Empfindungsmöglichkeiten nach oben beschränkt. Wir können also »Glück« überhaupt nur bis zu einer bestimmten Schwelle fühlen und erleben.

Beides zusammen führt dazu, dass wir gar nicht in der Lage sind, uns beliebig auf einer nach oben und unten offenen Gefühlsskala zu bewegen, wenn wir unser Glück oder unsere Lebenszufriedenheit benennen. Stattdessen orientieren wir uns an Referenzpunkten, mit denen wir einigermaßen einschätzen können, wie gut es uns tatsächlich geht. Das könnte das Einkommen von Nachbarn oder Kollegen sein, aber auch das eigene vom letzten Jahr. Rayo und Becker argumentieren, dass es im Lauf der Evolution stets wichtig war, die eigene Leistung und ihre relative Position richtig einzuschätzen. Ein Jäger, der immer schlechter als seine Kollegen abschneidet, leistet sich vermutlich systematische Fehler. Um das zu erkennen, muss er seinen Jagderfolg im Verhältnis zu dem von anderen einordnen.

MIT FRDL. GEN. VON RICHARD A. EASTERLIN

Der US-Wirtschaftsforscher Richard A. Easterlin untersuchte in den 1970er Jahren den Zusammernhang zwischen Geld und Glück. Seine bis heute kontroverse These: Wir werden zwar immer reicher, fühlen uns aber deshalb nicht besser.

Aber das bedeutet nicht unbedingt, dass für unser Glück ausschließlich relative Positionen ausschlaggebend sind. Unsere Augen stellen etwa ihre Empfindlichkeit auf die Lichtverhältnisse ein. Wenn wir in einem dämmrigen Raum sind, arbeitet das Sehsystem in einem anderen Größenordnungsbereich als im gleißenden Sonnenlicht. Dennoch können wir in beiden Fällen sagen, wie viel Licht uns umgibt, denn auch die absolute Helligkeit fließt in die Berechnung ein. Warum sollte es mit unserem Empfinden von Glück anders sein?

Was also ist von dem Easterlin-Paradoxon zu halten? Was spricht dagegen, dass es in der strengen Form gilt, in der viele es gegenwärtig noch vertreten? Ein erster und naheliegender Zweifel: Repräsentieren die Daten zur subjektiven Lebenszufriedenheit – immerhin Grundlage der gesamten Glücksforschung – hinreichend gut die tatsächliche Lebenszufriedenheit der Menschen? Offenbar nicht. Tatsächlich scheinen die Angaben, die Menschen machen, wenn man sie bittet, ihr Leben auf einer Skala von 0 bis 10 zu bewerten, nicht besonders zuverlässig zu sein. So haben Forscher überprüft, ob eine zweite Befragung der gleichen Probanden im Abstand von Stunden oder Tagen abermals zu den gleichen Resultaten führt. Zwar waren die Antworten bei beiden Befragungen noch signifikant miteinander korreliert. Doch lag der Korrelationskoeffizient gerade mal bei 0,5 – weit entfernt also von dem Wert 1, den man bei identischen Antworten erhalten müsste.

Außerdem stellte sich heraus, dass Angaben zur Lebenszufriedenheit durch Dinge beeinflusst wurden, die in dem Kontext eigentlich keine Rolle spielen dürften. Zum Beispiel durch das Wetter. Bei Sonnenschein sind Menschen häufig besser gelaunt als bei Regen; und so scheint die momentane Stimmung ein gewichtiger Faktor zu sein, wenn es darum geht, die Zufriedenheit einzuschätzen. Sichtbar machte diesen Effekt etwa ein Experiment, das der deutsche Sozialpsychologe Norbert Schwarz an der University of Michigan 1987 durchgeführt hat. Die Versuchsanordnung: In einer Universitätsbibliothek wurde auf dem Kopierer eine Münze (10 US-Cent) platziert, so als ob der letzte Nutzer des Kopierers diese aus Versehen dort liegen gelassen hätte.

Alle Studenten, die sie fanden, steckten die Münze ohne zu zögern ein. Beim Verlassen der Bibliothek wurden sie angesprochen, ob sie an einer Befragung teilnehmen möchten. Darin wurde auch die subjektive Lebenszufriedenheit ermittelt. Resultat: Die Studenten, die das Geld gefunden und an sich genommen hatten, gaben eine signifikant höhere Werte zu Protokoll als die Kontrollgruppe jener, bei denen keine Münze auf dem Kopierer platziert worden war. Es genügen offenbar 10 Cent, um einen Menschen in eine Laune zu versetzen, in der er mit seinem Leben insgesamt deutlich zufrie-

CONFUCIUS INSTITUTE, UNIVERSITY OF CHICAGO (CIUC)

Der amerikanische Ökonom Gary S. Becker sowie sein Kollege Luis Rayo machten klar, dass wir unsere Zufriedenheit zumeist an Personen, Dingen und Umständen orientieren, die uns dauernd umgeben.

dener ist als zuvor. Vor diesem Hintergrund wird klar, warum der Kabarettist Eckart von Hirschhausen dazu aufruft, in der Fußgängerzone ab und zu 10 oder 20 Cent fallen zu lassen, um Menschen zu beglücken.

Bedeutet das nun, dass wir uns überhaupt nicht auf die erhobenen Daten zur Lebenszufriedenheit stützen können? Nicht unbedingt. Zweifellos spielen zufällige Einflüsse eine wichtige Rolle. Aber gerade weil sie zufällig sind, können wir auch davon ausgehen, dass es zu keinen systematischen Verzerrungen der Basisbefunde kommt. Außerdem erwarten wir, dass sich in einer großen Zahl der Befragungen zufällig verteilte Einflüsse herausmitteln. Studien, die auf sorgfältig und in großer Zahl durchgeführten Befragungen (wie etwa dem SOEP) beruhen, sind damit gegen diesen Einwand gefeit. Eine ganz andere Frage ist, ob es eigentlich genügt, den Testpersonen zu ihrem Glücksempfinden nur eine einzige Frage zu stellen. Können wir unsere Lebenszufriedenheit auf nur eine Zahl reduzieren? Gehen da nicht wesentliche Informationen verloren? Zumindest zwei zentrale Aspekte geraten dabei aus dem Blickfeld – zum einen der zeitliche Aspekt, zum anderen die unterschiedlichen Dimensionen von Glücksempfinden.

Variable Zufriedenheit zu verschiedenen Zeiten

Daten zur Lebenszufriedenheit werden zu einem bestimmten Zeitpunkt erhoben. Man muss sie sich aber als einen stetigen Strom von Empfindungen vorstellen, nicht nur als Momentaufnahme. So wird klar, dass die Lebensdauer eines Menschen seine Antworten beeinflusst.

Nun begründen manche zwar mit dem Easterlin-Paradoxon, warum Wirtschaftswachstum und Streben nach höheren Einkommen nutzlose Unterfangen sind. Unbestreitbar war aber der permanente Anstieg der Lebenserwartung in den entwickelten Industrienationen nur durch Wachstum möglich. Es stellte Ressourcen bereit zur Verbesserung etwa der medizinischen Forschung, des Gesundheitssystems, der Ernährung oder der allgemeinen Hygiene.

So trifft die Formel »Mehr Einkommen gleich mehr Gesundheit« sowohl innerhalb einer Gesellschaft als auch im Vergleich verschiedener Gesellschaften zu. Selbst wenn wirtschaftliches Wachstum sonst keinerlei positive Effekte hätte – allein seine lebensverlängernde Wirkung würde die Menschen länger glücklich machen. Das setzt natürlich voraus, dass die hinzugewonnene Lebenszeit ähnlich glücklich verbracht wird wie der vorherige Teil des Lebens. Genau das lässt sich aber auch aus den Daten herauslesen, die beispielsweise der Soziologe Ruut Veenhoven (Erasmus-Universität Rotterdam) und der Ökonom Michael Hagerty (University of California in Davis) 2006 zu den »Happy Life Years« erhoben haben.

Ein weiteres Argument gegen das Easterlin-Paradoxon: Vergleiche der Lebenszufriedenheit zu unterschiedlichen Zeiten sind höchst problematisch, auch wenn sie bei ein und derselben Person vorgenommen werden. Denn die Bedeutung der Skala, mit der gemessen wird, verändert sich mit der Zeit. Laut der oben erwähnten Theorie von Rayo und Becker müssen wir uns an lokalen Referenzgrößen orientieren. Genau diese verschieben sich aber allmählich – beispielsweise, weil unser Einkommen steigt.

Angenommen ein junger Mensch wird danach gefragt, wie zufrieden er mit sich ist. Um dies sinnvoll beantworten zu können, wird er sich vorstellen, wie denn sein Leben aussehen müsste, damit er »vollkommen zufrieden« wäre, er also eine 10 vergeben könnte. Wenn nun der gleiche Mensch zehn Jahre später wieder befragt wird und er inzwischen genau jenen angestrebten Zustand erreicht hat, ist es wahrscheinlich, dass er diesen jetzt keineswegs mehr als den Endpunkt der Skala ansieht. Sein Referenzpunkt hat sich inzwischen längst verschoben. Daraus ergibt sich, dass wir nicht sicher sein können, was es bedeutet, wenn ein Mensch bei beiden Befragungen etwa eine 7 angekreuzt hat.

Der zweite Aspekt, der in den früheren Studien unbeachtet blieb: Die Glücksforschung konzentrierte sich nur auf eine Zahl, was die unterschiedlichen Dimensionen von Glücksempfindungen ignorierte. Mit der Standardfrage nach der Selbsteinschätzung der Lebenszufriedenheit werden die Befragten letztlich aufgefordert, eine eher kognitive Bewertung ihres Lebens vorzunehmen. Um eine Antwort auf der Skala von 0 bis 10 zu geben, müssen sie verschiedene Lebensaspekte bewerten und gewichten: Wie gut ist mein Job? Wie geht es in der Familie, in der Partnerschaft? Wie zufrieden bin ich mit meiner Gesundheit?

Es bedarf einer erheblichen geistigen Anstrengung, um diese Fragen zu beantworten und nach entsprechender Gewichtung zu einem Gesamturteil zu kommen. Die so gewonnene kognitive Lebenszufriedenheit unterscheidet sich jedoch grundlegend von einem affektiv empfundenen Glück. Dieses ist eine rein emotionale Angelegenheit, die sich unserer bewussten Steuerung weit gehend entzieht. Das schöne Gefühl, das wir haben, wenn wir unsere Kinder in den Arm nehmen oder wenn jemand, den wir mögen, uns ein Lächeln schenkt, hat wenig mit der abstrakten Gesamtbewertung unseres Lebens zu tun.

Affektives Empfinden von Glück und Unglück kann man genauso messen wie kognitive Lebenszufriedenheit. Zwei Befunde sind in diesem Zusammenhang bedeutsam. Zum einen zeigt sich, dass kognitive und affektive Zufriedenheit

keineswegs gleichgerichtet sein müssen. Das belegt eine Studie, die wir 2010 zusammen mit einem Magdeburger Kollegen durchführten. Darin untersuchten wir die Lebenszufriedenheit sowie den so genannten Nettoaffekt von Arbeitslosen und Beschäftigten. Der Nettoaffekt gibt die durchschnittliche Stärke der positiven und negativen Emotionen an, die Menschen in jeder Einzelaktivität eines Tages erlebt hatten.

Arbeitslos – aber dennoch zufrieden?

Hinsichtlich der kognitiven Lebenszufriedenheit zeigte sich das gleiche, wenig überraschende Ergebnis wie schon in zahlreichen Untersuchungen zuvor: Sie ist bei Arbeitslosen deutlich geringer als bei Menschen, die Arbeit haben. Dennoch gab es eine Überraschung: Der Befund gilt nicht für den Nettoaffekt! Emotional gesehen kommen Arbeitslose offenbar genauso gut durch den Tag wie Beschäftigte. Noch frappierender ist eine weitere Studie, die wir 2012 abgeschlossen haben. Dort zeigte sich, dass Männer, die verheiratet waren und deren Frauen arbeiteten, unter ihrer Arbeitslosigkeit am stärksten litten – jedenfalls wenn man ihre kognitive Lebenszufriedenheit betrachtet. Gleichzeitig ist es aber diese Gruppe, die den höchsten Nettoaffekt aufweist, also die positivsten Emotionen!

Neuere Daten, die sowohl kognitive Zufriedenheit als auch Emotionen messen, zeigen einen starken Zusammenhang zwischen Einkommen und kognitiver Lebenszufriedenheit. Sie belegen aber auch, dass dieser beim affektiven Glück weniger stark ausgeprägt ist. Gilt das Easterlin-Paradoxon also wenigstens für diese Dimension des Glücks? Und lassen sich damit die politischen Forderungen, die aus dem Paradoxon abgeleitet wurden, vielleicht doch noch aufrechterhalten? Das wäre in jedem Fall problematisch, wenn man sich an die unterschiedlichen Auswirkungen der Arbeitslosigkeit erinnert. Traut man dem affektiven Glück zu, eine Richtschnur für politische Entscheidungen zu liefern, bräuchten wir uns über Arbeitslosigkeit keine Gedanken mehr zu machen. Das wäre aber verantwortungslos. Bloß weil Menschen auch unter sehr schlechten Bedingungen positive Gefühle haben können, rechtfertigt das nicht die schlechten Bedingungen.

Ein weiteres Argument gegen die Gültigkeit des Easterlin-Paradoxons: Die Daten des World Value Surveys, aus denen dieses Paradoxon ursprünglich abgeleitet wurde, gelten inzwischen wegen methodischer Schwächen als ungeeignet. In einzelnen Ländern wurden die Daten unterschiedlich erhoben und mit verschiedenen Methoden ausgewertet, so dass die Resultate kaum miteinander vergleichbar sind. Die jüngere Glücksforschung verwendet deshalb inzwischen vor allem den so genannten Gallup World Poll, der in seinen Verfahren als wesentlich homogener und konsistenter gilt.

Die US-Ökonomen Betsey Stevenson und Justin Wolfers haben 2008 die Daten der wichtigsten Länder intensiv bearbeitet und die schlimmsten Verfahrensfehler der Vergangenheit korrigiert. Verwendet man die überarbeiteten Daten, verschwindet das Easterlin-Paradoxon fast in allen Ländern. Stattdessen tritt ein deutlicher Zusammenhang zwischen absolutem Einkommen und durchschnittlicher Lebenszufriedenheit zu Tage. Eine prominente Ausnahme bilden übrigens die USA. Ausgerechnet dort sind reichere Menschen nicht unbedingt zufriedener. Das könnte sich dadurch erklären, dass in diesem Land zwar der Durchschnittsverdienst gestiegen ist, gleichzeitig aber auch die Ungleichheit in den Einkommen stark zugenommen hat. Insoweit relative Positionen eine Rolle spielen, könnte der negative Effekt der zunehmenden Ungleichheit den positiven Effekt des höheren Gehalts überdecken. Die konstante durchschnittliche Zufriedenheit in den USA kann somit auch nicht als Beweis angeführt werden, dass Geld nicht glücklich macht.

Alles in allem zeigt sich: Die Glücksforschung ist nicht wirklich geeignet, eine verlässliche Richtschnur für politische Entscheidungen zu liefern. Das bedeutet aber nicht, dass ihre Ergebnisse bedeutungslos sind – im Gegenteil. Sie bereichern unser Bild von der Lebenszufriedenheit und dem Glück der Menschen. Ein Ersatz für alles, was man bisher über die Wirkung von Wohlstand und Einkommen zu wissen glaubte, sind sie aber nicht.

DIE AUTOREN

Joachim Weimann (von rechts nach links) ist Professor für Wirtschaftspolitik an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg und Vorsitzender der Gesellschaft für experimentelle Wirtschaftsforschung. Seine Forschungsinteressen liegen in der Umweltökonomik, der Arbeitsmarktpolitik und der experimentellen Wirtschaftsforschung.
Ronnie Schöb ist Professor für Finanzwissenschaft an der Freien Universität Berlin. Er studierte Volkswirtschaftslehre an der Universität München, wo er auch promovierte und habilitierte.
Andreas Knabe hat den Lehrstuhl für Finanzwissenschaft an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg inne. Er promovierte dort in Volkswirtschaftslehre. Danach war er als Juniorprofessor für Arbeitsmarkt- und Sozialpolitik an der Freien Universität Berlin tätig.

QUELLEN

Easterlin, R. A.: Does Economic Growth Improve the Human Lot? Some Empirical Evidence. In: David, P. A., Reder, M. W. (Hg.): Nations and Households in Economic Growth. Stanford University Press, Palo Alto 1974, S. 90–125
Frey, B. S., Frey Marti, C.: Glück, die Sicht der Ökonomie. Zürich, Rüegger 2010
Knabe, A. et al.: Dissatisfied with Life, but Having a Good Day: Time-Use and Well-Being of the Unemployed. In: The Economic Journal 120, S. 867–889, 2010
Weimann, J. et al.: Geld macht doch glücklich. Wo die ökonomische Glücksforschung irrt. Schäffer-Poeschel, Stuttgart 2012

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1168631**

LEBENSQUALITÄT LÄSST SICH EINRICHTEN.

JETZT AM KIOSK.

Altersgerechtes Wohnen und Leben hat viele Facetten:
Mit Freunden zusammen leben, betreut wohnen oder altersgerecht umbauen – nie gab es so viele Möglichkeiten für die Generation 60plus, das Leben zu gestalten.

Das neue FOCUS-SPEZIAL stellt alle wichtigen Wohnkonzepte vor und sagt, für wen sie geeignet sind.

Extra: Die 869 besten Pflegeheime in Deutschland – was sie bieten, wie viel sie kosten.

FOCUS-SPEZIAL gibt es auch unter:
Tel. 0180 5 480 1000*, Fax 0180 5 480 1001*,
www.focus-spezial.de
*0,14 €/Min. aus dem dt. Festnetz.
Mobil max. 0,42 €/Min.

ALLES ZU EINEM THEMA.
IN EINEM HEFT.

FOCUS SPEZIAL

SPIELTHEORIE

Verkuppeln auf Mathematisch

Kombinatorische Optimierung verhilft vielleicht nicht zu ewigem Eheglück, aber doch zu einer geringeren Scheidungsrate.

VON DOMINIQUE DUMONT

Meine Großmutter ist eine kluge und überaus liebenswerte Frau; aber meine Tante Kunigunde … ach du liebe Güte! Sie saß schon da, als ich der Großmutter meinen Sonntagsbesuch abstattete, verbreitete ausgiebig den Dorfklatsch und kam alsbald auf ihr Lieblingsthema: wer denn wohl demnächst wen heiraten würde. Dazu hatte sie stets sehr dezidierte Meinungen, die sie jedem verkündete, der sie hören wollte oder auch nicht. Aber diesmal war sie in echter Verlegenheit.

»Die kleine Tanja Baumann, du weißt schon, die Dunkelhaarige mit der extravaganten Brille: Stefan Pawlitzki hat es auf sie abgesehen! Und du wirst es nicht glauben, aber Roland Schumacher, der Sohn vom Fischhändler aus der Rathausgasse, der fährt auch auf sie ab. Die Kleine ist ja so was von niedlich! Aber sie steht mehr auf unseren kleinen Martin. Und der hat nur Augen für Kathrin Huber. Ach, es ist schrecklich kompliziert!«

Die Tante begrüßte mich flüchtig, nur um ohne Pause weiterzureden. Am liebsten hätte sie das ganze Dorf verkuppelt, aber jedes ihrer Arrangements hätte so viele gebrochene Herzen hinterlassen, dass sie auf der Stelle ein weiteres austüftelte – das dann nicht weniger Seelenschmerz erzeugt hätte.

Irgendwann hielt ich das Geschratel nicht mehr aus: »Teure Tante, deine Lebenserfahrung in allen Ehren, und wir wissen, dass es in Liebesdingen unvereinbare Präferenzen gibt; aber versuch doch, das Problem mathematisch anzugehen. So können wir das ganze Dorf unter die Haube bringen.«

»Lieber Junge, was bist du naiv! Du kannst doch nicht Tanja mit Stefan und Roland zugleich verheiraten!«

»Nein, aber stabile Ehen stiften. Nicht dass ich jedem und jeder seinen oder ihren Traumpartner verschaffen könnte; aber wir finden immerhin eine zufrieden stellende Lösung.«

»Willst du mich ins Grab bringen? Was hätte ich dann noch zu tun, wenn alle Paare vereint und glücklich wären?«

»Ach – die Mathematik bietet noch ganz andere Freuden …«

»Das bezweifle ich!« Tante Kunigunde lehnte sich mit erhobener Nase in ihrem Sessel zurück, aber Großmutter stellte ihr Hörgerät lauter. Ich fuhr fort:

»Jeder Mann schreibt die Frauen der Reihe nach in eine Liste: zuerst diejenige, die ihm am liebsten wäre, dann seine zweite Wahl und so weiter. Die Frauen tun dasselbe mit den Männern. Hier ein Beispiel« (Bild rechts oben).

Stabile Ehen

»Wenn man nun die Männer und Frauen irgendwie verkuppelt, dann kann es passieren, dass ein Mann seiner eigenen Frau die eines anderen vorzieht – und die ihm tatsächlich in die Arme fällt, weil er ihr besser gefällt als der eigene Mann. Eine solche Lösung nennen wir instabil, denn sie geht nicht lange gut« (Bild S. 84, *a*).

Die Tante hörte auf einmal wieder zu. Das klang nach Schicksal, Herzschmerz … »Klingt interessant, aber wie willst du so etwas vermeiden?«

»Die stabilen Lösungen«, fuhr ich fort, »sind die, wo ein Mann vielleicht seiner Frau eine andere vorzieht, die aber lieber bei ihrem Mann bleibt.«

»Oder umgekehrt«, ergänzte Großmutter.

»Ja sicher. Nehmen wir an, in unserem Beispiel wären die Paare Stefan und Kathrin, Roland und Christine, Martin und Tanja« (Bild S. 84, *b*). »Eigentlich wären sowohl Stefan als auch Roland lieber mit Tanja zusammen als mit der jeweils eigenen Frau, aber das nützt nichts: Tanja bleibt bei Martin. Der würde ihr zwar am liebsten davonlaufen, aber weder Christine noch Kathrin würden sein Werben erwidern.«

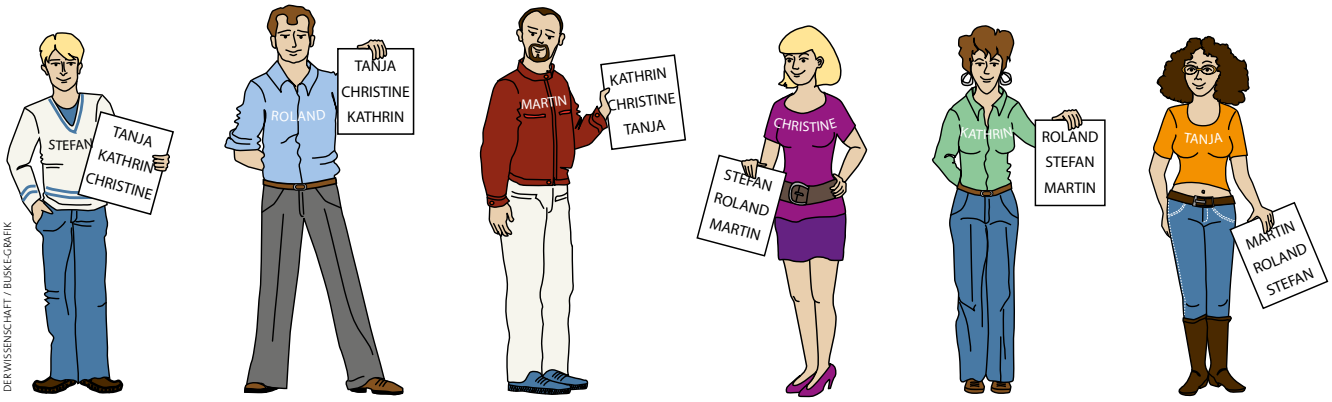
»Aber wie behältst du in der Verwirrung der Gefühle den Überblick?«

»Ganz einfach – mit Mathematik. Es gibt immer eine stabile Lösung und sogar ein Verfahren, sie zu finden. Die Amerikaner David Gale und Lloyd Shapley haben es 1962 veröffentlicht. Ich nenne es ›Algorithmus mit Herrenwahl‹; du wirst gleich sehen, warum.

Die Damen sitzen in einem Raum; die Herren betreten ihn einer nach dem anderen in irgendeiner Reihenfolge und bitten die Dame ihrer ersten Wahl um ihre Hand. Wenn diese noch frei ist, legt sie ihn an die Leine – vorläufig, als Anwärter. Hat sie schon einen Anwärter, so kommt derjenige unter den beiden, der ihr lieber ist, an die Leine – wo er vielleicht schon war –, und den anderen schickt sie weg. Jeder Abgewiesene kommt später wieder, bittet die nächste Dame in seiner persönlichen Rangliste, und so weiter. Sowie jede Dame einen Anwärter an der Leine hat, machen sich die Paare auf zum Standesamt.«

»Da haben diese Amerikaner aber nichts Neues erfunden«, warf meine Tante ein. »Das haben wir beim Abschlussball in der Tanzstunde ganz ähnlich gemacht.«

»Das mag sein; aber Gale und Shapley haben als Erste das Verfahren korrekt beschrieben und bewiesen, dass es stets zu einer stabilen Lösung führt«,



ALLE GRAFIKEN DES ARTIKELS: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK

Die Ausgangssituation: Stefan wäre am liebsten mit Tanja zusammen, Kathrin wäre ihm auch recht, und zur Not würde er mit Christine vorliebnehmen. Entsprechend sind die anderen Präferenzlisten zu verstehen. Die Beteiligten zeigen ihre Listen nicht öffentlich vor. Es genügt, wenn jeder seine im Kopf hat.

erwiderte ich. »Erstens findet das Bäumchen-wechsel-dich-Spiel irgendwann ein Ende. Kein Herr kann zweimal dieselbe Dame fragen. Wenn es n Damen und n Herren gibt, muss also jeder Herr höchstens n-mal den Raum betreten, und nach höchstens n^2 Anträgen sind alle unter der Haube.«

»Und wieso ist diese Lösung stabil?«

Greifen wir irgendeinen Mann und irgendeine Frau heraus, die nicht miteinander verheiratet sind. Dann hat entweder er ihr nie einen Antrag gestellt, weil sie in seiner Liste erst nach den Frauen kommt, die er gefragt hat, also auch nach seiner jetzigen Ehefrau; oder er hat sie gefragt, aber sie hat ihn weggeschickt, weil es (nach ihrer Liste) Bessere gab, die sie gefragt haben, darunter ihren jetzigen Ehemann. In keinem Fall kann es vorkommen, dass beide sich mehr zueinander hingezogen fühlen als zu ihrem eigenen Gatten. Also gibt es keine Instabilität.«

»Das klingt so einfach, wenn du das erzählst«, sagte meine Großmutter. »Lass mich das mal durchprobieren.«

»Hast du noch Plätzchen?«, fragte die Tante hastig. Großmutter schüttete aus ihrem Vorrat auf den Teller nach, bevor sie zu Papier und Bleistift griff, um den Algorithmus der Herrenwahl nachzuvollziehen (Bild S. 85). Kaum hatte ich mich ihr zugewandt, war der Plätzchenteller schon wieder leer, und ich verstand, warum manche Leute in jeder Präferenzenliste ganz unten landen.

»Da kommt aber etwas anderes heraus, als du vorgeschlagen hast«, bemerkte die Tante mit vollem Mund.

»Richtig, und zwar kommen die Herren dabei besser weg, zumindest Roland und Martin. Die Damen sind dagegen weniger glücklich.«

»Könnten man nicht die Rollen von Damen und Herren vertauschen?«, fragte Großmutter.

»Sicher. Beim Algorithmus mit Damenwahl sind die Ehepaare Stefan und Christine, Roland und Kathrin, Martin und Tanja. Optimal für die Damen, aber für die Herren das Schlimmste, was ihnen passieren konnte.«

»Opfer müssen gebracht werden«, sagte die Tante im Brustton ihrer langen Erfahrung.

Ein Nein ist für immer

Ich fuhr fort: »Beim Problem der stabilen Ehen kommt es nicht so sehr darauf an, eine stabile Lösung zu finden, sondern eine unter mehreren stabilen Lösungen auszuwählen. Vorab muss man sich eine wichtige Eigenschaft der Lösung klarmachen, die durch Herrenwahl zu Stande kommt: Wenn eine Frau F einen Mann M abweist (weil ihr ein besserer zur Verfügung steht), dann ist F für M unerreichbar, das heißt, er wird sie nicht nur nicht heiraten, sondern es gibt überhaupt keine stabile Konstellation, in der M und F verheiratet sind.

Um das einzusehen, betrachten wir eine Antragsrunde nach der anderen. Wenn F bei der ersten Gelegenheit, bei der sie überhaupt die Auswahl hat, M zu Gunsten eines anderen Mannes abweist – nennen wir ihn M' –, dann ist sie unerreichbar für M. Eine Ehe M–F wäre nämlich eine Quelle der Instabilität, denn M' ist für F attraktiver als M (deswegen hat sie M ja weggeschickt), und F ist für M' attraktiver als seine Frau, denn F ist seine Favoritin, sonst hätte er sie nicht als Erste gefragt.

Wenn F bei der zweiten Gelegenheit M abweist – nennen wir den siegreichen Konkurrenten wieder M' –, dann wäre eine Ehe M–F nur haltbar, wenn M' eine Frau heiratet, die er F vorzieht. Das könnte aber nur die Frau F' sein, die ihm in der ersten Runde einen Korb gegeben hat (die Präferenzliste von M' beginnt also mit F' und F); die ist für M' unerreichbar aus demselben Grund, den wir soeben für F und M in der ersten Runde dargelegt haben. Und wieder wird es nichts mit F und M.

So führt man das Argument von Runde zu Runde fort, mit dem Ergebnis, dass ein Mann einen Korb bitter ernst nehmen sollte. Die Frau, die ihn wegschickt, hätte er unter keinen Umständen haben können, auch mit einem anderen Auswahlverfahren nicht; sie ist für ihn unerreichbar – jedenfalls in einer stabilen Konstellation.

Am Ende heiratet beim Herrenwahl-Algorithmus M die (nach seiner Liste) beste unter denen, die ihn nicht abgewiesen haben. Nach dem obigen Argument ist das die beste, die er überhaupt kriegen konnte, denn alle anderen sind unerreichbar. Im Nachhinein können wir schließen, dass das Ergebnis bei der Herrenwahl nicht von der Reihenfolge abhängt, in der die Männer antreten,

und für die Männer optimal ist. Jede Lösung, die einem von ihnen besser gefallen würde, ist instabil.«

»Ist ja gut«, insistierte Tante Kunigunde, »aber welchen Grund gibt es, die Männer so zu bevorzugen?«

»Du hast völlig Recht, liebe Tante. Wir müssen einen stabilen Kompromiss finden, der Männern wie Frauen gerecht wird. Zunächst werden wir sehen, dass es eine konfliktfreie Lösung nur gibt, wenn jeder und jede mit der Nummer eins auf seiner oder ihrer Liste verheiratet ist, wenn also nur eine einzige stabile Lösung existiert. Sowie es mehrere gibt, hat in jedem Paar einer der Partner einen Grund, unzufrieden zu sein. Mehr noch: Die optimale Lösung für die Herren ist nicht nur anders als die optimale Lösung für die Frauen, sondern sogar so verschieden wie nur möglich.«

»Das hätte ich jetzt nicht gedacht«, musste die Tante zugestehen, »bei all meiner Erfahrung.«

»Nehmen wir zwei verschiedene stabile Lösungen *A* und *B* zum selben Satz an Präferenzlisten. Es gibt also zwei fiktive Welten, in denen dieselben Leute unterschiedlich verpaart sind. Wir können sie in drei Gruppen unterteilen: die ›*A*-Fans‹, die lieber in *A* leben, weil sie ihren *A*-Partner höher schätzen als ihren *B*-Partner; die ›*B*-Fans‹, denen es umgekehrt geht; und die, denen es nicht darauf ankommt, weil sie in beiden Welten mit derselben Person verheiratet sind. Nehmen wir weiter an, *M* und *F* sind in *A* verheiratet, nicht aber in *B*. Dann finden sie sich unvermeidlich in verschiedenen Fanklubs wieder. Denn wenn *M* zum Beispiel *A* bevorzugt, kann *F* nicht auch *A* bevorzugen, denn sonst würden sie einander attraktiver finden als ihre jeweiligen *B*-Ehegatten und wären damit in *B* eine Quelle der Instabilität, was der Voraussetzung ›*B* ist stabil‹ widerspricht.

Im Endeffekt sind in beiden Welten alle *A*-Fans mit *B*-Fans verheiratet. In jedem Paar und in jeder Welt gibt es also einen Partner, der lieber in der jeweils anderen Welt leben würde – abgesehen von jenen, denen es sowieso egal ist.«

»Aber Junge«, sagte Großmutter erschrocken, »bist du da nicht ein bisschen arg pessimistisch?«

»Schau dir doch unseren Bekanntenkreis an …«

Die Paarung *a* ist instabil, denn Roland und Tanja wären miteinander glücklicher als mit dem jeweils eigenen Ehegatten. Das kann bei der stabilen Paarung *b* nicht passieren. Nur bekommt diesmal lediglich eine Person (Tanja) ihre erste Wahl, während es bei Lösung *a* zwei sind (Stefan und Martin).

Struktur der Lösungsmenge

Der berühmte Mathematiker John Conway hat gezeigt, wie man aus den zwei Welten sehr einfach eine neue, noch bessere basteln kann – besser im Sinn des männlichen Geschlechts. In dieser Welt bekommt jeder Mann seine *A*-Frau oder seine *B*-Frau, je nachdem, welche er bevorzugt. Das ergibt eine neue Welt *C*, und auch sie ist stabil.

»Wie kann das gehen?«, fragte die Tante, stieren Blicks über dem leeren Plätzchenteller meditierend.

»Ganz einfach. Zunächst muss man sich klarmachen, dass auf diese Weise überhaupt eine Lösung zu Stande kommt, dass also nicht zwei Herren auf dieselbe Dame zugreifen möchten. Dieser Fall könnte nämlich nur eintreten, wenn der eine Herr ein *A*-Fan und der andere ein *B*-Fan ist. Dann wäre die doppelt begehrte Frau die *A*-Frau des *A*-Fans und zugleich die *B*-Frau des *B*-Fans. In der ersten Eigenschaft müsste sie dann ein *B*-Fan sein, in der zweiten aber ein *A*-Fan, was unmöglich ist.

Warum ist die Welt *C* stabil? Nun, selbst dort kann es vorkommen, dass auch ein Mann *M* sich eine bessere Frau *F* vorstellen könnte als seine *C*-Ehefrau; er würde also *F* sowohl seiner *A*-Frau als auch seiner *B*-Frau vorziehen. Aber *F* wird seine Zuneigung nicht erwidern; denn ihr *A*-Mann gefiel ihr schon besser als *M*, sonst wäre *A* nicht stabil; für ihren *B*-Mann gilt derselbe Grund, und einer von beiden ist ihr *C*-Mann. Gegen den hat *M* also bei *F* keine Chance.«

Man bezeichnet diese Lösung *C* mit $\sup(A, B)$ (»Supremum von *A* und *B*«), weil sie – vom Standpunkt der Männer, wohlgemerkt – sowohl *A* als auch *B* überlegen ist. Eine Frau dagegen hat wenig Anlass, über *C* zu jubeln, denn dort bekommt sie von beiden möglichen Männern den schlechteren zugewiesen. Sie würde sich die Welt $D = \inf(A, B)$ (»Infimum von *A* und *B*«) wünschen, bei der sie sich von ihren beiden Männern den besseren aussuchen darf.

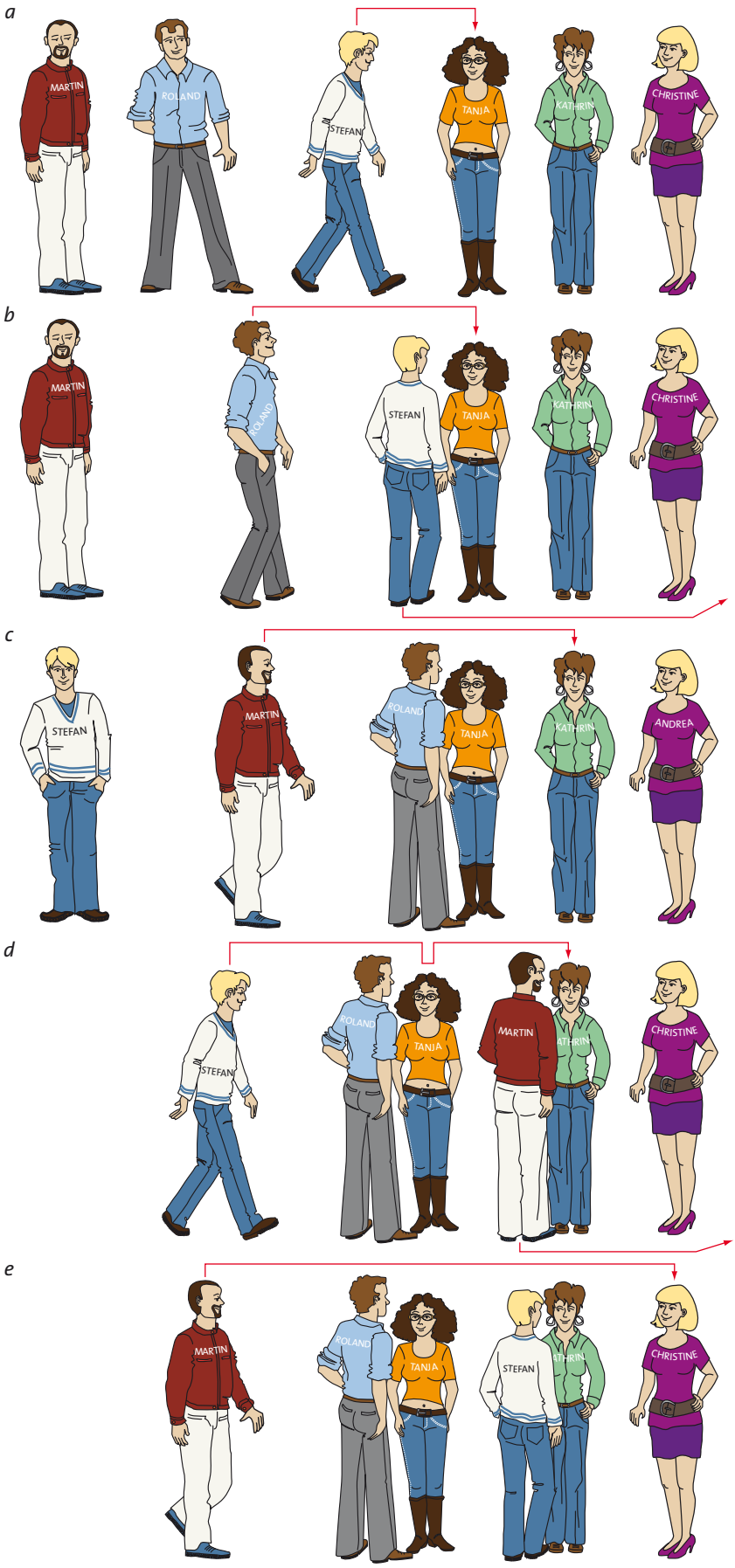
»Was ist das für ein merkwürdiges Zeug? Was hat das noch mit Romantik, roten Rosen und einem sorgsam ausgehandelten Ehevertrag zu tun?«

»Ach liebe Tante! Conways Formalismus verschafft uns einen Überblick und gibt der Menge der möglichen Lösungen eine Struktur. Zu zwei beliebigen stabilen Lösungen finden wir immer ein Supremum, das die Männer begünstigt, und ein Infimum, das die Frauen begünstigt. Das gibt ein ganzes Geflecht von Lösungen, an deren Endpunkten die Lösung mit Herrenwahl und die mit Damenwahl stehen.«

»Das ist ja schön«, sagte meine Großmutter, »aber wäre es nicht viel wichtiger, eine mittlere Lösung zu finden, die für alle Beteiligten am wenigstens schlecht ist?«

»Schon; aber das ist nicht einfach. Zuerst definiert man die Schlechtigkeit einer Welt als Zahlenwert und sucht dann die Welt mit der geringsten Schlechtigkeit. So propagieren es die Utilitaristen« (Spektrum der Wissenschaft 1/2005, S. 102).

»Man definiert zunächst«, fuhr ich fort, »den persönlichen Frust jedes Menschen als die Nummer seines Ehepartners auf seiner Präferenzliste mi-



Der Algorithmus der Herrenwahl am Beispiel der Präferenzen von S. 83: Stefan fragt Tanja, die ihn akzeptiert *(a)*; Roland fragt Tanja, die verstößt daraufhin Stefan *(b)*; Martin fragt Kathrin und wird von ihr akzeptiert *(c)*; aber Stefan kommt wieder, fragt Kathrin und schlägt Martin aus dem Feld *(d)*; Martin fragt Christine und wird akzeptiert *(e)*.

Stefan	1 Christine 2 Kathrin 3 Tanja	**Roland**	1 Kathrin 2 Christine 3 Tanja	**Martin**	1 Kathrin 2 Tanja 3 Christine
Christine	1 Roland 2 Stefan 3 Martin	**Kathrin**	1 Stefa 2 Rola 3 Mart	**Tanja**	1 Martin 2 Stefan 3 Roland

1 Stefan
2 Martin
3 Roland

Indem Kathrin an die Stelle ihrer eigentlichen Präferenzen fiktive setzt (rotes Schild), kann sie das Endergebnis zu ihren Gunsten beeinflussen.

nus eins. Wer also die Frau seiner Träume errungen hat, ist wunschlos glücklich mit Frust null, wer mit seiner dritten Wahl vorliebnehmen musste, lebt mit einem Frust von zwei. Die Schlechtigkeit einer Welt ist dann die Summe aller persönlichen Fruste.«

»So ungefähr habe ich das gemeint«, sagte Großmutter. »Aber so formal klingt das furchtbar unromantisch.«

»Es hilft auch leider nicht viel. Bei den drei Arrangements unserer sechs jungen Leute, die wir uns angesehen haben, kommt jedes Mal eine Frustsumme von sechs heraus. So finden wir also keine ›gerechte‹ Lösung.«

»Aber gibt es denn wenigstens eine, die eine Ausgewogenheit unter den Geschlechtern herstellt?«

»Das sieht schlecht aus. Die Menge aller stabilen Lösungen hat zwar eine reichhaltige mathematische Struktur mit den beiden extremen Elementen ›Damenwahl‹ und ›Herrenwahl‹. Aber ›mittlere Elemente‹ gibt es sehr viele, und man hat kein gutes Kriterium, um eines davon für optimal zu erklären.«

»Außerdem«, fiel die Tante ein, »ist das alles sowieso viel zu theoretisch. Heiraten ist Politik! Da wird gelogen und manipuliert, was das Zeug hält.«

»Ein guter Punkt, Tante. Unterstellen wir, dass die Damen, warum auch immer, es hinnehmen, dass der traditionelle Algorithmus der Herrenwahl praktiziert wird. Nehmen wir weiter an, dass sich einer der Beteiligten durch eine ebenso diskrete wie erschöpfende Recherche Kenntnis von allen Präferenzlisten verschafft hat, während jeder andere nur seine eigene Liste kennt.«

»Nichts leichter als das«, sagte die Tante. »Dazu genügt es, mit mir befreundet zu sein.«

»Umso besser. Der so Privilegierte kann den Ausgang der Geschichte bestimmen, indem er über seine eigenen Präferenzen lügt, ohne dass jemand Verdacht schöpft.«

Vom Nutzen der Lüge

Nehmen wir an, die Gefühlslage der Beteiligten wäre eine völlig andere, und Kathrin wäre vollständig darüber informiert (Bild oben). Dann kann sie sich ausrechnen, wie die Herrenwahl ablaufen wird: Stefan fragt Christine, Roland Kathrin, Martin ebenfalls Kathrin. Den weist sie ab, woraufhin Martin vor Tanja auf die Knie fällt. Das ergibt die Paare Stefan und Christine, Roland und Kathrin, Martin und Tanja.

Aber Kathrin will eigentlich Stefan. Also handelt sie gegen ihre wahren Gefühle so, als wäre ihr Martin lieber als Roland. Als die beiden bei ihr zur Auswahl stehen, schickt sie Roland weg. Der geht zu Christine und verdrängt dort Stefan. Der geht daraufhin zu Kathrin, die ihn jubelnd in die Arme schließt.«

»Raffiniertes Miststück, diese Kathrin«, sagte die Tante mit allen Zeichen der Anerkennung. »Das kommt mir irgendwie bekannt vor.«

»Das Endergebnis ist in diesem Fall Stefan und Kathrin, Roland und Christine, Martin und Tanja. Genau das wäre bei Damenwahl herausgekommen.

Man könnte denken, dass ein Mann in der entsprechenden Situation – er allein kennt alle Präferenzen – den Ausgang zu seinem Vorteil manipulieren könnte. Aber das stimmt nicht. Lester Dubins und David Freedman haben gezeigt, dass unter der Herrenwahl ein Mann durch Lügen sein Schicksal nicht verbessern kann. Allenfalls hilft das einem seiner Mitbewerber.«

Unterstellen wir, Kathrins vorgebliche Präferenzen im Bild links wären ihre echten; dann führt der Algorithmus der Herrenwahl auf die Paare Stefan und Kathrin, Roland und Christine, Martin und Tanja. Wenn Stefan – in Kenntnis aller Präferenzlisten – so tut, als hätte er lieber Tanja als Kathrin, dann endet die Sache mit den Paaren Stefan und Tanja, Roland und Christine, Martin und Kathrin. Martin hat sich verbessert, Roland geht es mit seiner Christine so gut wie zuvor, und Stefan erhält die gerechte Strafe für seine Lüge: Er gerät an Tanja, die er gefragt hat, obgleich er sie eigentlich nicht wollte. Zu allem Überfluss ist die Lösung instabil, denn Stefan und Kathrin haben allen Anlass, miteinander durchzubrennen und einen Scherbenhaufen zu hinterlassen.

»Das habe ich schon immer gesagt«, wusste Tante Kunigunde zu bemerken. »Wenn Männer lügen, ist das allenfalls wirkungslos und im schlimmsten Fall gefährlich; in diesem Punkt sind ihnen die Frauen weit überlegen.«

»Na ja«, sagte Großmutter. »Das stimmt – in einer Welt, in der die Männer behaupten, sie hätten die Wahl und würden entscheiden, und die Frauen die Dinge dann regeln.« ~

DER AUTOR

Dominique Dumont war Dozent für Mathematik an der Université de Strasbourg. Seit seiner Pensionierung lebt er auf Madagaskar.

QUELLEN

Dubins, L. E., Freedman, D. A.: Machiavelli and the Gale-Shapley Algorithm. In: The American Mathematical Monthly 88, S. 485–494, 1981

Gale, D., Shapley, L.: College Admissions and the Stability of Marriage. In: The American Mathematical Monthly 69, S. 9–15, 1962

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1168632

Sie möchten noch mehr WISSEN?

Erleben Sie ZEIT WISSEN, das intelligente Wissenschaftsmagazin!
Lesen Sie Neues und Spannendes über Wissenschaft, Technik, Umwelt und Gesundheit:
faszinierend, lebendig und lebensnah.

Der Einfluss von Sprache auf das Denken

Wenn Unternehmer für die Forschung stiften

Dossier: Synthetische Biologie

Tiere in der deutschen Wildnis

Jetzt im Handel, mehr Informationen auch unter:
www.zeit-wissen.de oder per Tel. 0180/52 52 909

(14 Cent/Min. aus dem deutschen Festnetz, max. 42 Cent/Min. aus dem Mobilfunknetz)

ZEIT WISSEN

Frühwarnsystem für bedrohte Welten

Mitunter brechen komplexe Ökosysteme scheinbar überraschend zusammen. Doch solche Desaster kündigen sich an und wären oft noch abwendbar, würde man die Vorboten erkennen. Dafür nutzen Forscher zunehmend mathematische Modellierungen.

Von Carl Zimmer

Der Peter Lake, ein winziger See im Norden der USA, liegt tief im Ahornwald von Wisconsin nahe der Grenze zu Michigan. Hier setzten Ökologen im Juli 2008 zwölf Forellenbarsche aus. Gleichzeitig platzierten sie im See Sensoren, die viele Monate lang im Fünfminutentakt die Wasserklarheit und somit auch das Algenaufkommen messen sollten. Im folgenden Jahr ließen die Forscher um Stephen Carpenter von der University of Wisconsin in Madison dort noch zweimal je 15 der großen Raubfische frei, die fast einen Meter lang werden können.

Zunächst tat sich äußerlich nicht viel. Doch im Sommer 2010 veränderte der See plötzlich seine Farbe: Vorher war er grün und voller Algen gewesen, nun wurde das Wasser klar. Denn darin tummelten sich jetzt Unmengen von Wasserflöhen und anderen Organismen, die Algen fraßen. Zwei Jahre zuvor hatten vielerlei kleine Raubfische, darunter Elritzen und kleine Sonnenbarsche, die Winzlinge dezimiert. Aber diese Fische, die hier noch vor Kurzem die Nahrungskette dominiert hatten, standen nun nicht mehr länger an der Spitze. Die Neuankömmlinge hatten unter ihnen tüchtig aufgeräumt.

DAVID LIITTSCHWAGER

Der neue Zustand ist bis heute so geblieben. Was war geschehen? Das stabile frühere Nahrungsnetz – also die Nahrungsbeziehungen zwischen den verschiedenen Bewohnern des Sees – war kollabiert, und ein neues hatte sich aufgebaut. Den Umschwung hatten die Wissenschaftler in diesem Fall absichtlich provoziert. Und zwar reiht sich die Studie in experimentelle Forschungen ein, mit denen sie Faktoren aufspüren möchten, die im Zusammenhang mit Fressen und Gefressenwerden dauerhafte Veränderungen der Artendichten bewirken.

Gerade in den letzten Jahrzehnten beobachten Ökologen vielerorts, und oft unerwartet, Umbrüche ganzer Nahrungsnetze – meist in viel größerem Ausmaß als bei dem geschilderten Experiment. Vor Namibia etwa nehmen Quallen überhand, in den Marschen vor North Carolina Schnecken und Pilze. Im Nordwestatlantik sind die Kabeljau-(Dorsch-)Bestände kollabiert, während die Hummer prächtig gedeihen.

Ob im Einzelfall Überfischung daran schuld ist, die Schaffung neuer Agrarflächen, städtische Bebauung oder die Erderwärmung – fest steht: Die Menschheit setzt gegenwärtig viele der großen Ökosysteme einem enormen Stress aus. Fachleute rechnen damit, dass in den kommenden Jahren noch so manche eingespielte Lebensgemeinschaft kippen wird. Solch ein Ereignis vorherzusagen, um es vielleicht noch abzuwenden, ist jedoch alles andere als einfach, denn Nahrungsnetze sind dazu oft viel zu komplex aufgebaut.

Der Peter Lake ist schon seit 30 Jahren ökologisches Forschungsobjekt. Anhand des reichen Datenmaterials entwickelten Carpenter und seine Mitarbeiter mathematische Modelle für das Verhalten von Nahrungsnetzen. Von daher konnten sie bei ihrem Experiment bereits 15 Monate im Voraus erste Warnzeichen für das baldige Umschlagen des Sees erkennen. Denn die Rechenmodelle haben inzwischen, zumindest ansatzweise, einige der Gesetzmäßigkeiten aufgezeigt, die darüber bestimmen, ob ein Nahrungsnetz stabil bleiben wird oder ob es demnächst an seine Grenzen zu stoßen und dann zu kollabieren droht.

Die Forscher möchten mit diesen Modellen den Stabilitätsgrad von Nahrungsnetzen erfassen und die gefährdeten unter ihnen identifizieren. Idealerweise hätte man damit ein Frühwarnsystem zur Hand, das etwa anzeigt, wann bestimmte menschliche Eingriffe dringend aufhören müssen. Vielleicht ließe sich manche fatale Entwicklung auf die Weise sogar noch rechtzeitig umkehren. Ist ein Ökosystem nämlich einmal gekippt, gelingt eine Rückkehr zum früheren Zustand nach aller Erfahrung wenn überhaupt, dann höchst mühsam. Vorsorge ist in jedem Fall die wesentlich bessere Option.

Mathematische Modelle für komplexe Ökogefüge

Seit rund 100 Jahren befassen sich Forscher mit den Regeln der Artenzusammensetzung von ökologischen Systemen. Sie möchten die Populationsgrößen der einzelnen Spezies verstehen – warum etwa in einem untersuchten Gebiet Fliegen in großer Anzahl auftreten und Wölfe in sehr geringer; oder warum es in manchen Jahren besonders viele Fliegen gibt und in anderen deutlich weniger. Zur Veranschaulichung der inneren Beziehungen des Systems pflegten sie die entdeckten Räuber-Beute-Muster in Netzdiagrammen darzustellen. In solchen Bildern markiert die Dicke der Verbindungen die gefressenen Mengen. Allerdings können zu einem Nahrungsnetz mehrere Dutzend, vielleicht auch einige hundert oder sogar tausende verschiedene Arten gehören. Da stößt die grafische Darstellung rasch an ihre Grenzen.

Derart komplexe Netze lassen sich nur mathematisch fassen. In solchen Modellen übersetzt man das Verhalten einer Art in eine Gleichung, die ihre Wachstums- (sprich Vermehrungs-)Rate auf verschiedene Faktoren wie das verfügbare Futter bezieht und zugleich darauf, wie oft diese Art selbst zur Beute wird. Jedoch sind sämtliche Einflüsse Variablen – was die Berechnungen der Gleichungen selbst für einfachste Nahrungsnetze erheblich erschwert. Heute stehen zum Glück leistungsstarke Computer zur Verfügung. Mit ihnen konnten Forscher in letzter Zeit das Verhalten ganz verschiedener Ökosysteme durchspielen.

In den komplexen Modellierungen stecken eine Reihe von – teils hochvariablen – Eigenschaften sowohl der Individuen als auch der Populationen: unter anderem die Dichte sowie die Alters- und Geschlechtszusammensetzung der

Forellenbarsche wurden in einem kleinen nordamerikanischen See ausgesetzt, um dort die Rolle der obersten Räuber einzunehmen. Die dramatischen Folgen geben Einblick in die Funktionsweise von Nahrungsnetzen.

AUF EINEN BLICK

WANN REISSEN NAHRUNGSNETZE?

1 Mathematische Modelle simulieren das Verhalten der **Nahrungsbeziehungen in Ökosystemen**. Sie zeigen, welche Verbindungen einen Kollaps des ganzen Netzes auslösen könnten.

2 Ist ein System gekippt – sind also völlig **neue Verhältnisse** entstanden –, dann stellen sich die alten äußerst selten von selbst wieder ein. Auch mit **menschlichem Eingreifen** gelingt das, wenn überhaupt, nur mühsam.

3 Auf Simulationen gestützte **Frühwarnsysteme** erkennen einen **drohenden Zusammenbruch** an kleinen Anzeichen. Oft ist es dann zur **Rettung** des Ökosystems noch nicht zu spät.

einzelnen Arten, deren Mobilität und spezielle Ernährungsstrategien. Hinzu kommen Faktoren wie die Begegnungshäufigkeit zwischen einer Räuber- und einer Beuteart und der Schutz, den ein Habitat bietet. Auch physikalische Faktoren beeinflussen das Wachstum von Populationen, etwa jahreszeitliche Schwankungen. Beim Peter Lake berücksichtigt Carpenters Team insbesondere auch den Lichteinfall, weil der das Algenwachstum und damit die Nahrungsgrundlagen wesentlich mitbestimmt.

Einige Schlüsselprinzipien natürlicher Nahrungsnetze haben die Modelle wie gesagt schon aufgezeigt. So erwies sich, dass in den meisten Systemen keineswegs ein paar wenige kräftige Räuber-Beute-Verbindungen – in der bildlichen Darstellung breite Bahnen – vorherrschen, wie man früher dachte. Viel eher bestimmen eine Menge schwach ausgeprägte Beziehungen, also zahlreiche dünne Fäden, das Bild. Im ersten Fall wären einzelne Räuber überwiegend auf jeweils eine Beuteart fixiert, und diese hätte einen Hauptfeind. Tatsächlich frisst ein Räuber meist etliche verschiedene Tiere, wie auch die einzelnen Beutearten es mit vielerlei Fressfeinden zu tun haben.

Nahrungsnetze, in denen zahlreiche Verbindungen vorherrschen, sind auf Dauer stabiler und wohl deswegen viel häufiger anzutreffen als solche mit dominierenden Räuber-Beute-Präferenzen. Denn im ersten Fall kann es ein Raubtier leichter verkraften und sich anders orientieren, sollte eine der bevorzugten Beutearten rar werden. Auch vermag sich eine stark dezimierte Beutepopulation nicht selten sogar wieder zu erholen, weil ihre Hauptfressfeinde sie nun erst einmal in Ruhe lassen, da ihnen andere Tiere eher unterkommen. Folglich sind Arten unter solchen Bedingungen nicht so leicht von Ausrottung bedroht.

Zudem lassen die mathematischen Modelle verwundbare Stellen in Nahrungsnetzen erkennen: Bereiche, an denen kleine, zunächst wenig spektakuläre Veränderungen letztlich gesamte Ökosysteme treffen können. Lange hatten Forscher angenommen, dass diese hauptsächlich von der Basis her beherrscht werden, also von den Pflanzen und kleinen Tieren, die den größeren Tieren Nahrung liefern. Doch in den 1960er Jahren stellten Theoretiker Berechnungen an, denen zufolge Raubtiere an der Spitze eines Ökosystems erheblichen Einfluss auf andere Spezies nehmen können. Sie würden demnach unter Umständen indirekt sogar die Populationsdichte von Arten kontrollieren, die sie selbst überhaupt nicht fressen. In Fachkreisen stieß diese neue These einer Kontrolle »von oben nach unten« zunächst auf erhebliche Skepsis. War es wirklich möglich, dass ein geringer Anteil der Tiere eines Nahrungsnetzes, die wenigen Topräuber, so viel Macht ausübt?

Hierfür sprechen nicht zuletzt auch die Folgen von menschlichen Eingriffen in die Natur besonders in den letzten Jahrzehnten. Die Meere sind inzwischen von manchen großen Raubfischen wie dem Kabeljau ziemlich leer gefischt. Wölfe oder Luchse gibt es in weiten Regionen gar nicht mehr. Umgekehrt brachte der Mensch zum Beispiel neue Arten wie Ratten auf Inseln, wo sie keine Konkurrenten hatten und die Natur mitunter völlig veränderten.

Gesunde Natur mit Wölfen

Wie stark ein Topräuber die Verhältnisse bestimmen kann, lässt sich derzeit gut im Yellowstone-Nationalpark in Nordamerika beobachten (siehe SdW 8/2004, S. 24). Die ehemals letzten Wölfe wurden dort um 1930 abgeschossen. Daraufhin vermehrten sich insbesondere die Wapitis, die amerikanischen Rothirsche, übermäßig. Sie aber ließen nun bei den Bäumen kaum noch Jungwuchs aufkommen. Die Landschaft wandelte sich völlig, was auch vielen anderen Tieren zu schaffen machte, etwa den Bibern. Erst seit man Mitte der 1990er Jahre Wölfe neu ansiedelte, scheint sich die Natur langsam wieder zu fangen (siehe Kasten S. 92/93).

Ähnlich schwer wiegend wirkt sich mittlerweile vor der Ostküste der USA die Massenabschlachtung großer Haie durch die Fischindustrie auf das gesamte dortige Nahrungsnetz aus (siehe Kasten rechts). Die Vorkommen von Austern und Kammmuscheln sind zusammengebrochen. Denn die großen Haie erbeuteten kleinere Raubfische, wie Rochen und kleinere Haie, die sich nun stark vermehren. Beispielsweise explodierten die Bestände der Kuhnasenrochen geradezu. Diese ernähren sich von Muscheln und anderen Schalentieren und haben deren Populationen extrem dezimiert.

In vielen solchen Fällen hatten Ökologen nicht rechtzeitig erkannt, dass sich eine Katastrophe anbahnte. Ihr früh genug entgegenzusteuern ist aber oft entscheidend. Wie schwierig es sein kann, wieder die alten Verhältnisse herzustellen, zeigen beispielsweise die Kabeljauvorkommen im nordwestlichen Atlantik.

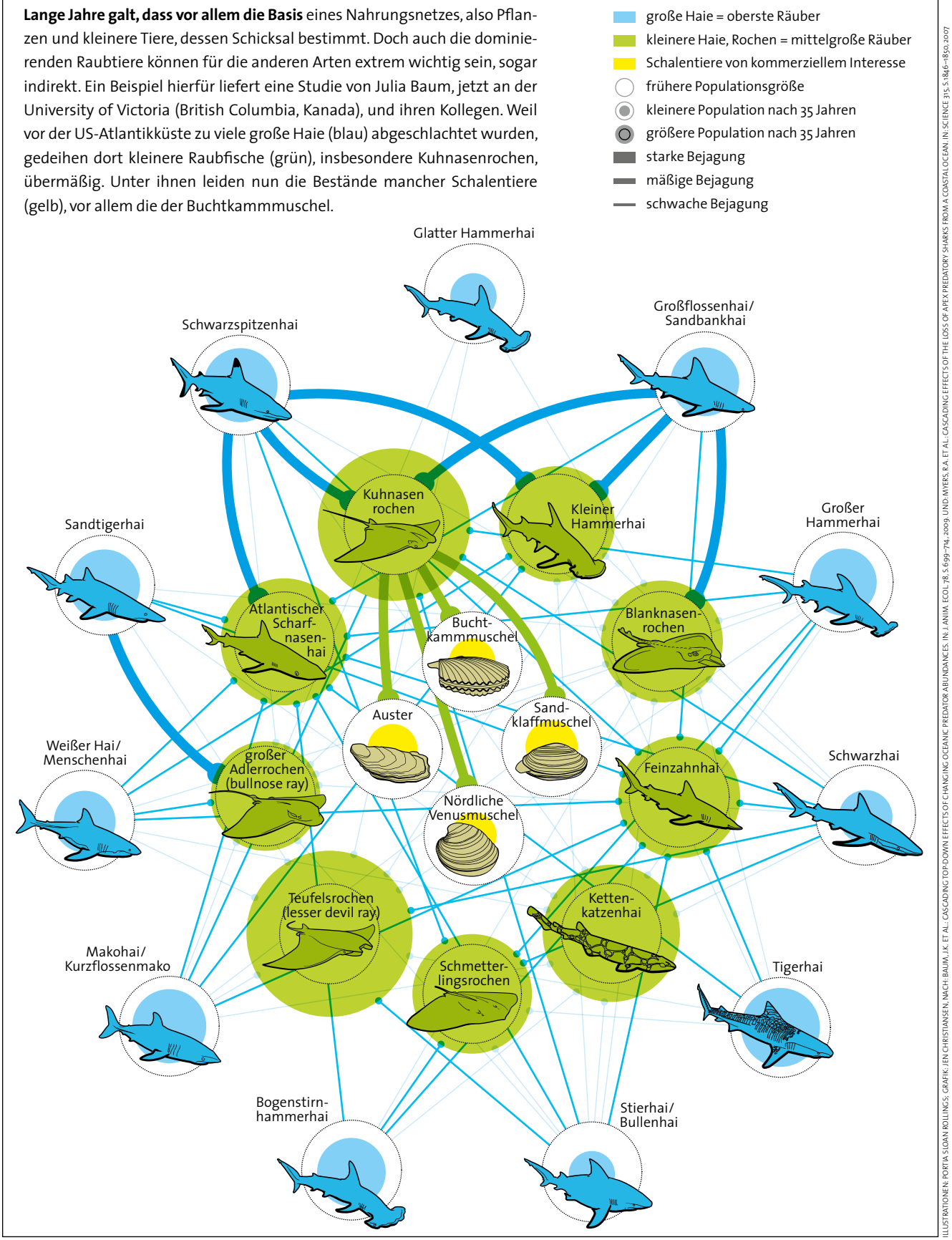
Die über mehrere Jahrzehnte völlig überfischten Bestände dieser recht gefräßigen Raubfische waren Anfang der 1990er Jahre völlig zusammengebrochen. Streng limitierte Fangquoten für Kabeljau, teils auch Fangverbote, sollten der Population wieder aufhelfen. Nach den mathematischen

MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de

Unser Online-Dossier »Artenvielfalt und Artensterben« finden Sie unter
www.spektrum.de/artenvielfalt

Nahrungsnetz aus der Balance

Lange Jahre galt, dass vor allem die Basis eines Nahrungsnetzes, also Pflanzen und kleinere Tiere, dessen Schicksal bestimmt. Doch auch die dominierenden Raubtiere können für die anderen Arten extrem wichtig sein, sogar indirekt. Ein Beispiel hierfür liefert eine Studie von Julia Baum, jetzt an der University of Victoria (British Columbia, Kanada), und ihren Kollegen. Weil vor der US-Atlantikküste zu viele große Haie (blau) abgeschlachtet wurden, gedeihen dort kleinere Raubfische (grün), insbesondere Kuhnasenrochen, übermäßig. Unter ihnen leiden nun die Bestände mancher Schalentiere (gelb), vor allem die der Buchtkammmuschel.



ILLUSTRATIONEN: PORTIA SLOAN ROLLINGS; GRAFIK: JEN CHRISTIANSEN, NACH: BAUM, J.K. ET AL.: CASCADING TOP-DOWN EFFECTS OF CHANGING OCEANIC PREDATOR ABUNDANCES. IN: J. ANIM. ECOL. 78, S. 699–714, 2009. LUND, MYERS, R.A. ET AL.: CASCADING EFFECTS OF THE LOSS OF APEX PREDATORY SHARKS FROM A COASTAL OCEAN. IN: SCIENCE 313, S. 1846–1850, 2007

Modellen, an denen sich die Verantwortlichen damals orientierten, hätte sich die geschonte Population eigentlich in fünf bis sechs Jahren wieder weit gehend erholen müssen. Doch die Vorhersagen trafen nicht ein. Noch nach sechs Jahren betrug die Populationsgröße nur wenige Prozent der früheren, und es gab lange keine Anzeichen für eine Regeneration.

Den Grund hierfür haben Kenneth Frank vom Bedford Institute of Oceanography in Darmouth (Nova Scotia, Kanada) und seine Mitarbeiter aufgedeckt. In die Rechnungen war nur eingeflossen, wie rasch sich der Kabeljau im Prinzip vermehren kann. Mögliche Wechselwirkungen im Nahrungsnetz hatte man nicht berücksichtigt. Jedoch haben sich seine diversen Beutearten, darunter Sprotten, Lodden, Hummer und Eismeergarnelen, nach dem Zusammenbruch der Kabeljaupopulation enorm vermehren können. Diese fressen tierisches Plankton und somit auch Laich und Larven ihrer Räuber. Früher hatte der Kabeljau die Bestände jener Arten niedrig gehalten. Nun aber war das System gekippt: Trotz des Fangverbots wuchs kaum noch Kabeljau nach.

Erst in den letzten Jahren finden Frank und seine Mitarbeiter Anzeichen für eine langsame Erholung des Kabeljaubestands. Der entspricht heute immerhin wieder etwa einem Drittel von dem vor wenigen Jahrzehnten. Der Grund dafür: Die Beutearten vom Kabeljau wuchsen dermaßen an, dass sie schließlich ihre eigenen Nahrungsgründe praktisch leer fraßen und nun selbst nicht mehr genug Futter finden. Daher beginnen ihre Populationen jetzt ihrerseits zusammenzubrechen – und die Kabeljaupopulation erhält eine neue Chance, dass mehr Tiere das Erwachsenenstadium erreichen und sich fortpflanzen. Noch ist nicht sicher, ob seine Bestände eines Tages wieder die alte Größe erreichen und dann die Beutetierpopulationen wie früher klein halten. Laut Frank scheinen sie auf dem Weg dahin zu sein. Der Forscher betont aber, dass man bei so komplexen Wechselspielen jederzeit auf unliebsame Überraschungen gefasst sein muss.

Vieles kann ein etabliertes Nahrungsnetz bedrohen. Manchmal ist es eine fremde Art, die sich breitmacht. Zum Beispiel richten seit einigen Jahren Rotfeuerfische in den Korallenriffen der Karibik und an der US-Ostküste zunehmend großen Schaden an. Die attraktiven Tiere mit den langen, giftigen Flossenstrahlen, die über 30 Zentimeter groß werden, sind im Pazifik heimisch. So mancher Aquarianer, der ihrer überdrüssig wurde, hat sie offenbar in den Atlantik »entsorgt« – und die bizarren, rot-weißen Raubfische gedeihen dort bestens. Sie fressen ein breites Spektrum kleiner Tiere, weswegen Ökologen schwere Auswirkungen auf die heimischen Raubfische befürchten. Sogar Haie könnten von diesen Neuankömmlingen verdrängt werden.

Maßgeblich: Große Raubtiere

Die Funktionsweise eines Ökosystems hängt oft eindeutig auch von den Arten an der Spitze der Nahrungsketten ab. Im Yellowstone-Nationalpark etwa hielten früher Wölfe die Zahl der Wapitis (amerikanische Rothirsche) niedrig. Als die Wölfe ausgerottet waren, vermehrten sich die Hirsche stark – und ließen keine jungen Bäume mehr hochkommen. Damit schwand der Lebensraum vieler anderer Tiere. Seit nun wieder Wölfe ausgesetzt wurden, beginnt sich die Natur zu regenerieren.

Wie kündigen sich Ökokatastrophen an?

Ebenso hat der Klimawandel unter Umständen schwer wiegende Folgen für Nahrungsnetze, etwa wenn sich die Verbreitungsgebiete – oder Zeitspannen ihres Auftretens – von Raub- oder Beutetieren in unterschiedlicher Weise verlagern. Mancherorts beobachten Ökologen schon dergleichen (siehe »Wenn der Frühling zu früh kommt«, SdW 4/2004, S. 56).

Dass es erheblich aufwändiger ist, ein bereits zusammengebrochenes Ökosystem wiederherzustellen, als es kurz vor dem Umkippen noch zu retten, ist Forschern längst klar. Doch die wenigsten vermochten sich bisher vorzustellen, woran sie eine nahende Katastrophe erkennen sollten. Ebenso wussten sie nicht, an welcher Stelle eines Nahrungsnetzes im Vorhinein am besten einzugreifen wäre. Auch hierbei sollen die mathematischen Modelle helfen. Wie echte Ökosysteme können simulierte plötzlich kollabieren. Und wer genau hinschaut, bemerkt dafür in der Simulation lange vorher zwar nur leichte, aber eindeutige Anzeichen – ähnlich dem fernen Grollen vor einem Gewittersturm.

So erholt sich beispielsweise ein virtuelles, bereits »lädiertes« Ökosystem nach einer Störung langsamer als ein noch gesundes. Übertragen auf natürliche Bedingungen heißt das: Wird das angeschlagene System etwa von einem Temperatursturz oder einer Seuche heimgesucht, schwingt es nicht so bald in den alten Zustand zurück wie ein gesundes. Je näher es dem Umschlagpunkt komme, desto länger benötige es nach solch einem Zwischenfall zur Erholung, stellt Marten Scheffer von der Universität Wageningen (Niederlande) fest, der an den Frühwarnsystemen mitarbeitet.

Die Forscher prüfen ihre Modelle in verschiedenster Weise an Organismen, zunächst unter streng kontrollierten Bedingungen im Labor. Am Peter Lake haben sie das Frühwarnsystem erstmals in der Natur ausprobiert. Nachdem sie die Forellenbarsche in den See gesetzt hatten, maßen sie täglich die

W I S wissenschaft in die schulen!

Didaktische Materialien für den Unterricht zum Thema »Ökosystem Wiese« kostenfrei herunterladen unter:

www.wissenschaft-schulen.de/oekosystem

PHOTO RESEARCHERS / HANS REINHARD

GETTY IMAGES / GERRY ELLIS

MINDEN PICTURES / DAVID SUCSY

Fischbestände sowie das Zoo- und das Phytoplankton. Zum Vergleich diente ihnen der direkt daneben gelegene, etwa gleich große Paul Lake, dessen Nahrungsnetz nicht manipuliert wurde. Wie eingangs erwähnt, änderten sich die Verhältnisse im Peter Lake erst zwei Jahre nach Versuchsbeginn drastisch. Doch schon im Sommer ein Jahr vor dem Wechsel fielen rasche Schwankungen des Chlorophyllgehalts – somit der Lichtverhältnisse – auf, die im Paul Lake nicht auftraten.

Jene starken Schwankungen erinnerten an das Verhalten von Simulationen kurz vor dem Kippen. Deswegen möchte Carpenters Team anhand der Modelle nun für verschiedenste Ökosysteme – Wälder, Feuchtgebiete, Meere – Beobachtungsinstrumente entwickeln, die auf solche Vorgänge ansprechen. Eigentliches Ziel der Messungen ist es natürlich, ökologische Desaster zu verhindern – sprich zu erkennen, wann es höchste Zeit wird, ein malträtiertes Ökosystem zu schonen oder sogar gezielt Gegenmaßnahmen zu ergreifen.

Inwiefern dieser Ansatz funktioniert, soll wiederum zuerst am Peter Lake geprüft werden. Diesmal wird der See gedüngt, was nach einiger Zeit eine Algenblüte hervorrufen dürfte. Das Wasser würde dann trüb, nur noch wenig Licht dränge in die Tiefe. Dadurch träte Sauerstoffmangel auf, der dem gesamten Ökogefüge zusetzen würde. Bei fortgesetzter Düngung wäre schließlich ein vermehrtes Sterben etlicher der großen Fische, auch der eingesetzten Forellenbarsche, zu erwarten. Carpenter vermutet, dass diese fortan über eine ganz geringe Dichte nicht mehr hinauskämen.

Allerdings rechnet er mit leichten Anzeichen für den kommenden Umschlag einige Monate im Voraus, die sich zum Beispiel als Schwankungen der Chlorophyllkonzentration bemerkbar machen könnten. Sobald dergleichen auftritt, wird er mit der Düngung aufhören. Dann, so die Prognose, sollte sich das ganze System wieder fangen: Der Algenwuchs ginge zurück, und der frühere Zustand würde sich wieder einpegeln. Der Paul Lake wird zu Vergleichszwecken weiterhin in Ruhe gelassen. Aber in den nahe gelegenen Tuesday Lake leiten die Forscher ebenfalls Nährstoffe ein, und bei diesem See werden sie trotz Alarmzeichen mit dem Düngen fortfahren und die Entwicklung verfolgen.

Bei allem Optimismus, dass derartige Frühwarnsysteme auch in anderen Situationen funktionieren und damit manchen Kollaps abwenden helfen, bleibt Carpenter realistisch. Zwar erscheinen die Modelle wegen der gleichartigen Organisationsprinzipien ökologischer Netze übertragbar. Doch wie die Simulationen zeigen, ist eine heftige Störung mitunter auch zu tief greifend und erfolgt zu rasch, als dass Ökologen sie rechtzeitig registrieren können. Das Fazit des Forschers: Es wird weiterhin böse Überraschungen geben – aber zumindest einige davon kann man mit dem Frühwarnsystem abwenden.

DER AUTOR

Carl Zimmer ist Wissenschaftsjournalist und Sachbuchautor. Er schreibt für renommierte amerikanische Zeitungen und Magazine, oft auch für »Scientific American«. Bei »Spektrum der Wissenschaft« erschienen bereits etliche seiner Artikel.

QUELLEN

Carpenter, S. R. et al.: Leading Indicators of Trophic Cascades. In: Ecology Letters 11, S. 128–138, 2008
McCann, K. S.: Food Webs. Princeton University Press, 2011
Strong, D. R., Frank, K. T.: Human Involvement in Food Webs. In: Annual Review of Environment and Resources 35, S. 1–23, 2010
Terborgh, J., Estes, J. A. (Hg.): Trophic Cascades: Predators, Prey, and the Changing Dynamics of Nature. Island Press, Washington 2010

LITERATURTIPP

Crist, D. T. et al.: Schatzkammer Ozean. Volkszählung in den Weltmeeren. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2010
Reich bebilderte Darstellung zu einem langjährigen internationalen Forschungsprojekt

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1168633**

Verrückter Stoffwechsel

»Die Annahme, daß manche Psychosen auf Anomalien des Stoffwechsels zurückgehen, hat in jüngster Zeit Stützung erfahren, und zwar durch Untersuchungen im Institut für Psychiatrie der Universität von Kalifornien an 50 akut Geisteskranken. Bei einem Vergleich der Eiweißkörper des Blutserums mit denen von Gesunden zeigten sich Abweichungen. Da das Gehirn die Proteinsynthese regelt, können diese als Auswirkungen eines gestörten Hirn-Stoffwechsels aufgefaßt werden.« Kosmos 12, 1962, S. 512

Satt in die Zukunft

»Der Nationalökonom T. R. Malthus nahm an, daß die Vermehrung der Menschheit geometrisch verlaufe, während die Nahrungsmittelproduktion nur arithmetisch zunehme. Tatsächlich vermehrt sich die Weltbevölkerung rascher, so daß eine Verdoppelung in rund 50 Jahren erwartet wird. Diese Zahlen werden, zumindest in der westlichen Welt, jedoch durch die Nahrungsmittelproduktion übertroffen, zumal die Vermehrungsrate mit steigendem Lebensstandard abzunehmen pflegt.« Naturwissenschaftliche Rundschau 12, 1962, S. 485

Milch von glücklichen Pflanzen

»Britische Wissenschaftler haben ein Verfahren zur Herstellung von Milch ohne Mitwirkung der Kuh entdeckt. Hauptzutat des Getränks, das sowohl in flüssiger als auch in fester Form auf den Markt kommen soll, ist grünes Gewächs vieler Arten: Erbsenhülsen, Gemüsekohlblätter, Unkraut, Nesseln und anderes. Den Herstellern ist es schon gelungen, die grünliche Farbe aus ihrer Milch zu entfernen. Gegenwärtig versuchen sie, dem Getränk noch einen gewissen Gemüsegeschmack zu nehmen.« Neuheiten und Erfindungen 325, 1962, S. 224–225

Dr. Frank Wokes, der Direktor des vegetarischen Forschungszentrums in Watford, nimmt einen Schluck Grasmilch.

Altbackenes Brot

»In einem Männergrab der Wikingerzeit (800–1050 n. Chr.) fand sich ein Brot, das aus einer verkohlten Masse bestand und die Form einer flachen Scheibe von 6 cm Durchmesser hatte. H. V. Rosendahl hat festgestellt, daß dieses Brot aus grobgemahlenen Ackererbsen und Fichtenrinde gebacken war und Silikatkörner enthielt, die wahrscheinlich von den Mahlsteinen herrühren. Dieser Fund ist der älteste Beleg der Erbsenkultur in Schweden, die aber bei den germanischen Völkern schon weit früher geübt worden ist.« Die Umschau in Wissenschaft und Technik 51, 1912, S. 1087

Die sprechende Lampe

»Bei geeigneten Versuchsbedingungen gelingt es, eine elektrische Glühlampe zum Sprechen zu bringen, wenn die Sprechströme einer Mikrophonanordnung dem Glühfaden zugeführt werden. Diese Beobachtung scheint darauf zurückzuführen zu sein, daß die Temperaturschwankungen, die dem Glühfaden durch die Sprechströme erteilt werden, sich dem Glas der evakuierten Birne mitteilen und dieses die umgebende Luft zu Schwingungen anregt. Dafür spricht, daß Birnen mit verhältnismäßig dünnem Glas besser zum Sprechen zu bringen sind, und daß andererseits Glühlampen mit dickeren Fäden infolge der hier auftretenden stärkeren Temperaturschwankungen das Sprechen ausgeprägter zeigen« Der Mechaniker 24, 1912, S. 283

Dick und dumm

»Daß unter den Säugetieren, die sich während der Miozänperiode über die Erde ausbreiteten, neben den kleinsten Formen die riesigsten Ungetüme vertreten waren, ist zur unumstößlichen Gewißheit geworden. Einen solchen miozänen Dickhäuter zeigt unsere Abbildung nach einem Aquarell, zu dem ein im ›Amerikanischen Nationalmuseum‹ zu New York aufgestelltes Titanothérium-Skelett als Vorwurf gedient hat. Diese ungeschlachten, nashornähnlichen Dickhäuter tummelten sich hauptsächlich in den miozänen Laubwäldern Nordamerikas, haben aber auch bei uns gelebt. Durch besondere Intelligenz scheinen sich diese plumpen Huftiere nicht gerade ausgezeichnet zu haben, da die Gehirnhöhle sehr klein ist.« Kosmos 12., 1912, S. 480

Masse statt Klasse?

AUS ZEITSCHRIFTEN DER FORSCHUNGSBIBLIOTHEK FÜR WISSENSCHAFT- UND TECHNIKGESCHICHTE DES DEUTSCHEN MUSEUMS

NEUES AUS DEM LESERSHOP

Kalender »Himmel und Erde 2013«

Astronomen präsentieren im Bildkalender »Himmel und Erde 2013« ihre schönsten Aufnahmen und lassen Sie an den fantastischen Möglichkeiten der modernen Naturbeobachtung teilhaben. Zusätzlich bietet er wichtige Hinweise auf die herausragenden Himmelsereignisse 2013 und erläutert auf einer Extraseite alle auf den Monatsblättern des Kalenders abgebildeten Objekte knapp und anschaulich. 14 Seiten; 13 farbige Großfotos; Spiralbindung; Format: 55 x 45,5 cm; € 29,95 zzgl. Porto; als Standing Order € 27,– inkl. Inlandsversand

www.spektrum.com/kalender2013

Ahnerts Astronomisches Jahrbuch 2013

Wann und wo ist welcher Planet am Himmel zu sehen? Welche besonderen Ereignisse sind in der kommenden Nacht zu beobachten? »Ahnerts Astronomisches Jahrbuch 2013« liefert alle wichtigen Informationen für das eigene Erkunden des Sternenhimmels. Der Kalender präsentiert Tag für Tag die bedeutendsten astronomischen Ereignisse. Sternkarten für jeden Monat, Beschreibungen der Himmelsobjekte und viele Astroaufnahmen erleichtern Ihnen die Orientierung am Nachthimmel. Für Einsteiger und fortgeschrittene Sternfreunde ist der »Ahnert« das unentbehrliche Standardwerk. 212 Seiten mit zahlreichen, meist farbigen Fotografien und Grafiken. € 10,90 zzgl. Porto, als Standing Order € 8,50 inkl. Inlandsversand, ISBN: 978-3-943702-09-5

www.spektrum.com/ahnert

Spektrum DER WISSENSCHAFT
WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

www.sterne-und-weltraum.de
E-Mail: service@spektrum.com
Tel.: 06221 9126-743

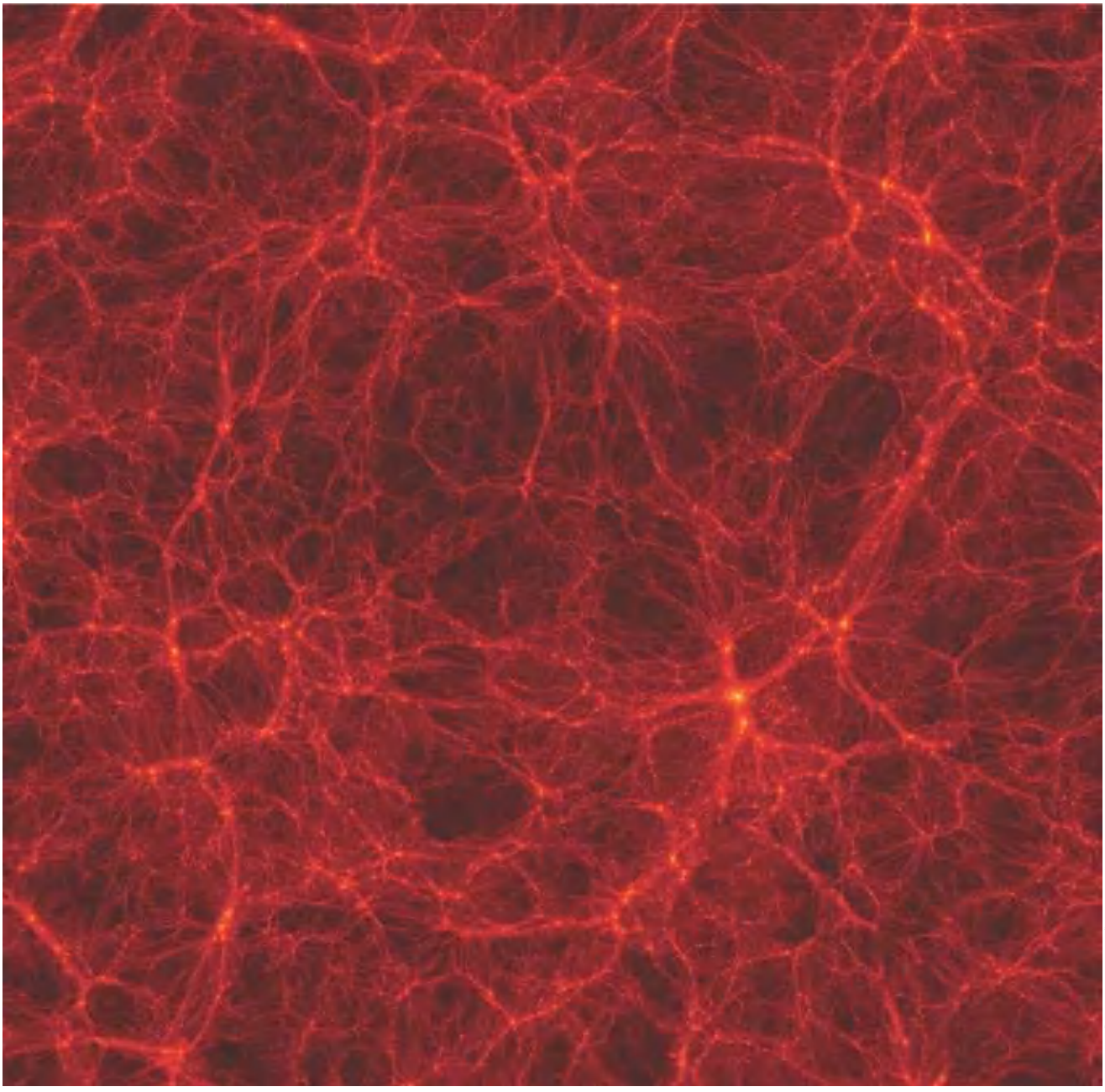
Fax: 06221 9126-751
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg

COMPUTERSIMULATION

Das Universum in der Kiste

Das Programm »Bolshoi« simuliert das Weltall als Würfel mit einer Milliarde Lichtjahre Kantenlänge – viel kleiner als das echte. Dabei müssen acht Milliarden gedachte Massenpunkte jeweils 200 Millionen Sonnenmassen vertreten. Und doch kommt der Endzustand des nachgemachten Universums der heutigen Gestalt des echten überraschend nahe!

Von Brian Hayes



STEFAN GOTTLÖBER, LEIBNIZ-INSTITUT FÜR ASTROPHYSIK POTSDAM

Wie übersichtlich und aufgeräumt war das Universum noch zu den Zeiten von Isaac Newton (1643–1727)! Um die Sonne kreisen sechs Planeten und um diese eine Hand voll Monde, gelegentlich fliegt ein Komet vorbei, und im Hintergrund leuchten die Fixsterne. Newton selbst hat den entscheidenden Beitrag dazu geleistet, die Welt aufzuräumen: Er schuf die mathematischen Hilfsmittel, mit deren Hilfe sich die Bewegung jedes dieser Himmelskörper berechnen lässt.

Sind Position und Geschwindigkeit für alle Körper zu einem bestimmten Zeitpunkt bekannt, dann ergibt sich aus Newtons universellem Gravitationsgesetz die Kraft, die auf jeden einzelnen von ihnen wirkt. Diese bestimmt (»Kraft ist Masse mal Beschleunigung«) die Änderung seiner Geschwindigkeit; daraus wiederum lassen sich seine Geschwindigkeit und damit seine Position zu einem geringfügig späteren Zeitpunkt berechnen. Mit den so gewonnenen Werten kann man anschließend auf gleiche Weise den Systemzustand noch ein wenig später bestimmen, und so weiter. Dieses numerische Verfahren löst das so genannte *n*-Körper-Problem: Welche Bahnen durchlaufen *n* Körper unter dem Einfluss ihrer gegenseitigen Gravitationsanziehung?

Genau genommen gelten die Gleichungen für die Änderung des Orts und der Geschwindigkeit nur ungefähr für kleine Zeiträume und exakt erst im Grenzwert verschwindend kurzer Zeiten. Aber die schwierige Frage, was das genau bedeutet, hatte Newton vorab geklärt, indem er die Differenzial- und Integralrechnung erfand. Mit Hilfe dieser theoretischen Werkzeuge kann man den Fehler abschätzen, der durch die Verwendung endlicher Zeitschritte (»Diskretisierung«) entsteht, und mit geeigneten Mitteln in Grenzen halten.

Newton hätte sich gewiss schon selbst an der Lösung des *n*-Körper-Problems versucht, wenn er geeignetes Rechengerät zur Verfügung gehabt hätte. Heute setzen wir dafür Computer ein; allerdings ist das Universum inzwischen auch erheblich umfangreicher geworden – und sehr viel unübersichtlicher als zu Newtons Zeiten. Wir wissen heute, dass unser Sonnensystem nur ein kleiner Fleck in der Milchstraße ist, einer Spiralgalaxie mit mehreren hundert Milliarden Sternen. Diese wiederum treibt inmitten von Milliarden anderer Milchstraßensysteme, die sich zu so genannten Clustern, Superclustern und einer ganzen Hierarchie weiterer Strukturen zusammengetan haben. Sie erstrecken sich, so weit das Auge – und vor allem das Teleskop – reicht.

Dies ist nur ein dünnes Scheibchen des simulierten Universums: 35 Millionen Lichtjahre dick, während die Kantenlänge des Bilds immerhin einer Milliarde Lichtjahre entspricht. Ein dunkelroter Punkt enthält ungefähr eine Galaxie, einer der größeren hellen Flecken einen Haufen aus Hunderten oder Tausenden von Galaxien. Das spitzendeckchenartige Muster entsteht – in der Simulation wie in der Realität – spontan dadurch, dass Materie unter dem Einfluss ihrer eigenen Anziehungskräfte kollabiert. Stefan Gottlöber vom Leibniz-Institut für Astrophysik in Potsdam hat Ergebnisse der Simulation »Bolshoi« zu diesem Bild verarbeitet.

AUF EINEN BLICK

GROSSES THEATER

1 **Bolshoi** ist ein Computermodell des Universums. Es arbeitet mit acht Milliarden Einzelmassen.

2 Die Berechnung der gegenseitigen Anziehungskräfte gelingt nur durch **raffinierte Approximationen** in akzeptabler Zeit.

3 Erste Vergleiche zeigen, dass die **simulierten Häufigkeiten** verschiedener Galaxientypen mit den beobachteten gut übereinstimmen.

Alle diese kosmischen Objekte streben beständig auseinander, weil sich das Universum ausdehnt; und diese Ausdehnung nimmt auch noch an Geschwindigkeit zu. Am erstaunlichsten ist jedoch, dass die gesamte leuchtende Materie aller Galaxien – also alles, was am Nachthimmel zu sehen ist – nicht mehr als ein halbes Prozent des Universums ausmacht. Der erdrückend große Rest besteht aus unsichtbaren Substanzen, die man mangels besseren Wissens schlicht als »Dunkle Materie« und »Dunkle Energie« bezeichnet.

Eine Geschichte der Geschichte des Universums

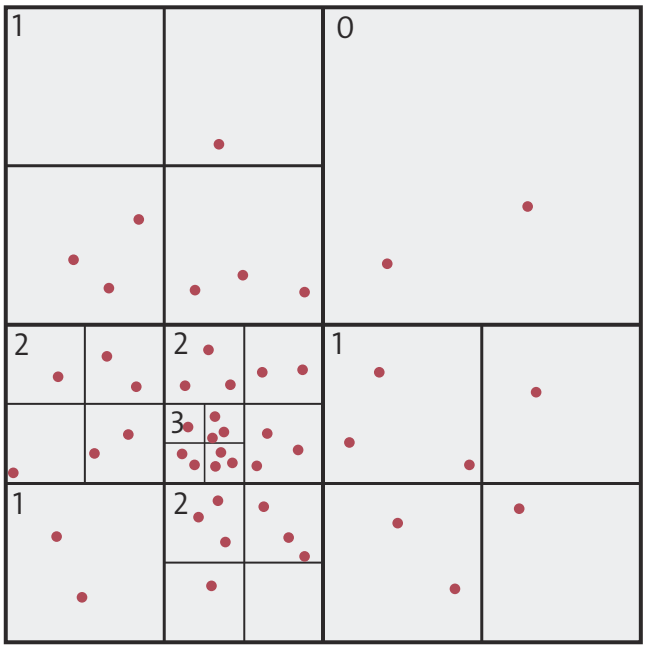
Im Weltall bewegt sich also ungeheuer viel mehr, als Newton je ahnen konnte. Aber erstaunlicherweise brauchen wir trotzdem keine neuen Gleichungen! Wenn wir diese Bewegungen nachrechnen wollen, müssen wir nur ein *n*-Körper-Problem lösen. Newtons Grundprinzipien der Mechanik beschreiben die Planetenbewegungen vor unserer Haustür ebenso wie die jahrmilliardenlangen Prozesse, in deren Verlauf sich Tausende von Galaxien in Fäden von hunderten Millionen Lichtjahren Länge angeordnet haben.

Seit einiger Zeit modellieren mehrere Arbeitsgruppen in umfassenden Simulationen die Entwicklung des ganzen Universums. Hier soll von einem Projekt namens »Bolshoi« die Rede sein; die Projektleiter sind Anatoly Klypin von der New Mexico State University und Joel Primack von der University of California in Santa Cruz.

»Bolschoi« ist das russische Wort für »groß« oder »gewaltig«, und der Name ist wahrhaft treffend gewählt: Das Vorhaben verbraucht sechs Millionen Rechnerstunden und produziert Daten im Umfang von 100 Terabyte. Dennoch ist das so simulierte Universum unvorstellbar winzig verglichen mit dem Original. Es grenzt sogar an ein Wunder, dass so viel Universum in einer so kleinen Kiste Platz hat.

Unser Bild vom Universum – und von unserem Platz darin – hat sich in den letzten 100 Jahren noch weit radikaler gewandelt als mit der kopernikanischen Revolution im 16. Jahrhundert.

Es begann in den 1920er Jahren mit der Erkenntnis, dass »Spiralnebel« nicht die Windrädchen aus Staub sind, für die man sie bis dahin gehalten und irgendwo zwischen den uns



Der Algorithmus »adaptive refinement tree« zerlegt den Rechenraum in würfelförmige Zellen, jede von ihnen in kleinere Tochterzellen (in diesem zweidimensionalen Schema vier Stück, im Original acht) und so weiter, bis in jeder von ihnen noch höchstens eine festgelegte Maximalzahl von Massen sitzt (in diesem Beispiel 3); außerdem dürfen sich benachbarte Zellen um nicht mehr als eine Größenklasse (Nummern in den Zellen) unterscheiden. Wenn Kräfte über große Entfernungen zu berechnen sind, werden alle Massen einer Zelle zu einer Ersatzmasse zusammengefasst und möglicherweise die Ersatzmassen mehrerer Zellen zu einer für die gemeinsame Mutterzelle.

benachbarten Sternen lokalisiert hatte. Vielmehr bestehen sie wie die Milchstraße (»Galaxis«), zu der unser Sonnensystem gehört, aus Milliarden von Sternen und sind sehr, sehr weit entfernt. Heute heißen sie »Galaxien«.

Wenige Jahre später fand Edwin P. Hubble, dass die Spektren fast aller Sterne zu längeren Wellenlängen hin verschoben sind. Diese »Rotverschiebung« deutete er als Beleg dafür, dass sich die Galaxien von uns entfernen. Hubble erkannte außerdem, dass die Geschwindigkeit dieser »Fluchtbewegung« proportional zu ihrer Entfernung ist: Das gesamte Universum dehnt sich aus.

Verfolgt man diese Expansion rechnerisch zurück, dann beginnt alles in einem einzigen gemeinsamen Ausgangspunkt, dem »Urknall« (Big Bang). Das Universum hat also ein Alter, und zwar nach heutiger Schätzung von etwa 13,7 Milliarden Jahren. Den überzeugendsten Beleg für das Urknallmodell lieferte 1965 die Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung. Vom frühen, heißen Universum ist ein Rest von Strahlung mit Spitzenwerten im Mikrowellenbereich des elektromagnetischen Spektrums übrig geblieben, was einer kosmischen Durchschnittstemperatur von 2,7 Kelvin entspricht.

In den 1970er Jahren galt das Urknallmodell als weit gehend gesichert. Einige Dinge blieben allerdings noch ungeklärt, so vor allem die Isotropie des Universums. Wenn wir uns umschauen, dann erscheint das Material im Kosmos überall sehr gleichmäßig verteilt, wie in einem gut verrührten Brei. Aber da kann niemand und nichts gerührt haben, weil dafür die Zeit nicht ausreichte. Es gibt Regionen im Universum, die niemals miteinander kommunizieren konnten, denn selbst das Licht hätte von der einen zur anderen länger gebraucht, als das Universum alt ist. Insbesondere kann kein Temperaturausgleich stattgefunden haben. Aber wieso haben dann selbst so weit voneinander entfernte Regionen dieselbe Temperatur?

Zur Erklärung musste die Geschichte des frühen Universums abermals radikal umgeschrieben werden: Inzwischen geht man davon aus, dass sich das Universum für Bruchteile von Sekunden explosionsartig ausgedehnt hat. Diese Episode »kosmischer Inflation« verlief derart rasant, dass sich ein winziger (und deshalb fast gleichförmiger) Raumausschnitt bis zu dem ausdehnen konnte, was heute unser gesamtes beobachtbares Universum ausmacht.

Ein weiteres ungelöstes Rätsel ist das der fehlenden Masse. Die Rotationsgeschwindigkeiten der Sterne in einer Galaxie hängen von ihrer Gesamtmasse und deren Verteilung ab. Ähnliches gilt auch in größerem Maßstab: Die Gesamtmasse eines Galaxienclusters beeinflusst die Bewegungen seiner Komponenten. Aus Messungen dieser Geschwindigkeiten erschließt sich für alle Galaxien eine weit größere Masse, als wir beobachten. Allem Anschein nach ist jede Galaxie eingehüllt in eine gewaltige Wolke, einen »Halo«, aus »Dunkler Materie« – einem Stoff, der unsichtbar ist, weil er elektromagnetische Strahlung weder aussendet noch absorbiert. Über seine Beschaffenheit wissen wir faktisch nichts – nur dass er offenbar 80 Prozent der Gesamtmaterie des Universums ausmacht.

Vor kaum mehr als zehn Jahren gab es die nächste große Überraschung. Zwei Gruppen von Astronomen hatten untersucht, wie sich die Geschwindigkeit der kosmischen Expansion im Lauf der Geschichte verändert hat. Eigentlich müsste die Gravitationsanziehung der allgemeinen Ausdehnung des Universums entgegenwirken, bis hin zu deren Umkehrung und dem finalen Kollaps, dem »Big Crunch« (Spektrum der Wissenschaft 5/2011, S. 36). Die Messungen zeigen dagegen, dass die Expansion nicht nur nicht nachlässt, sondern sich sogar beschleunigt. Irgendetwas muss den Raum auseinandertreiben. Dieses Etwas bekam den Namen »Dunkle Energie«; sie scheint sogar der Hauptbestandteil des Universums zu sein.

Alle diese Ideen gehören zu einem heute allgemein akzeptierten Modell der Kosmologie namens »ΛCDM«. Der griechische Buchstabe Λ (Lambda) ist das von Einstein benutzte Symbol für die von ihm eingeführte »kosmologische Konstante«, die heute eine Möglichkeit für das Verständnis der Dunklen Energie bietet. CDM steht für »kalte Dunkle Materie« (cold dark matter), »kalt« deswegen, weil ihre Partikel

sich im Gegensatz zu den Teilchen in einem heißen Gas nur mit geringer Geschwindigkeit bewegen.

Im ΛCDM-Modell macht die Dunkle Energie 73 Prozent der Substanz des Universums aus und die Dunkle Materie 23 Prozent. (Wegen $E = mc^2$ gibt es eine gemeinsame Maßeinheit für Masse und Energie.) Demnach besteht das Universum zu mehr als 95 Prozent aus Stoff, von dessen Existenz vor 30 Jahren noch niemand etwas ahnte. Nur 4,6 Prozent entfallen auf die uns geläufige Materie. Man nennt sie »baryonisch«, weil die Teilchen, die den größten Teil ihrer Masse ausmachen, nämlich Protonen und Neutronen, zur Klasse der Baryonen gehören. Sie besteht zum weit überwiegenden Teil aus Wasserstoffgas im intergalaktischen Raum; die Sterne in den Galaxien tragen gerade einmal 0,4 Prozent zur baryonischen Masse bei.

Beobachtung, Theorie, Simulation

Das klingt zwar alles wie eine Abfolge verrückter Ideen; aber jede einzelne von ihnen ist durch Beobachtungen gestützt, von einer physikalischen Theorie getragen und mittels Modellrechnungen (»Simulationen«) bestätigt, die Theorie und Beobachtung miteinander verknüpfen.

In den vergangenen 20 Jahren ist die Astronomie sogar zu einer statistischen Disziplin mit einem Überfluss an Daten geworden. So wurden in einer systematischen Himmelsdurchmusterung, dem »Sloan Digital Sky Survey«, 500 Millionen Objekte katalogisiert und beinahe zwei Millionen Spektren aufgezeichnet. Letztere gestatten die Messung der Rotverschiebung des Objekts und dadurch die Berechnung seiner Entfernung. Diese Daten ergeben eine dreidimensionale Karte, die ungefähr ein Drittel des Himmels überdeckt und mehr als eine Milliarde Jahre zurückreicht.

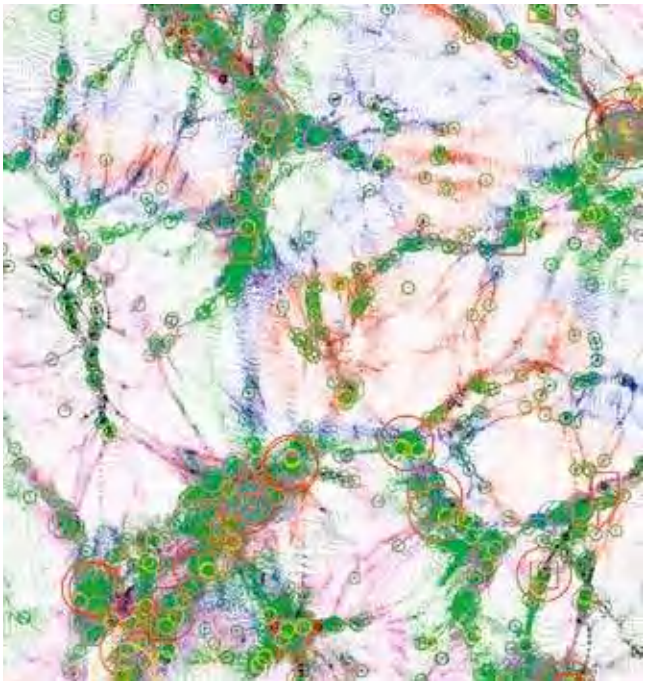
Ein anderes Forschungsvorhaben zielt darauf ab, den ältesten Photonen des Universums Informationen zu entlocken. Ein Satellit namens »Wilkinson Microwave Anisotropy Probe« (WMAP) zeichnet winzigste räumliche Schwankungen in der oben erwähnten Mikrowellen-Hintergrundstrahlung auf. Aus ihnen gewinnen wir ein – wenn auch sehr unscharfes – Bild von der Verteilung von Masse und Energie in einer frühen Phase des Weltalls: dem Anfangszustand des sichtbaren Universums.

Zur Beschreibung der Wechselwirkungen von Masse, Energie, Raum und Zeit im expandierenden Universum steht Einsteins allgemeine Relativitätstheorie zur Verfügung. Auch die Quantenmechanik spielt eine gewisse Rolle, etwa zur Erklärung von Fluktuationen im Mikrowellenhintergrund. Aber aus diesen theoretischen Grundlagen ergeben sich nicht ohne Weiteres Gestalt, Größe und andere Eigenschaften der Strukturen, die sich im Verlauf der Entwicklung des Universums herausgebildet haben. Diese findet man am besten mit Computersimulationen. Beginnend mit plausibel scheinenden Anfangsbedingungen berechnet man unter Anwendung der bekannten physikalischen Gesetze Ergebnisse, die dann mit den astronomischen Daten verglichen werden können. Die Abfolge verschiedener Zwischenstände dieser Berechnungen bietet uns nebenbei noch einen Einblick in die Geschichte des Universums: Wir können seine Entwicklung wie in einem Film verfolgen.

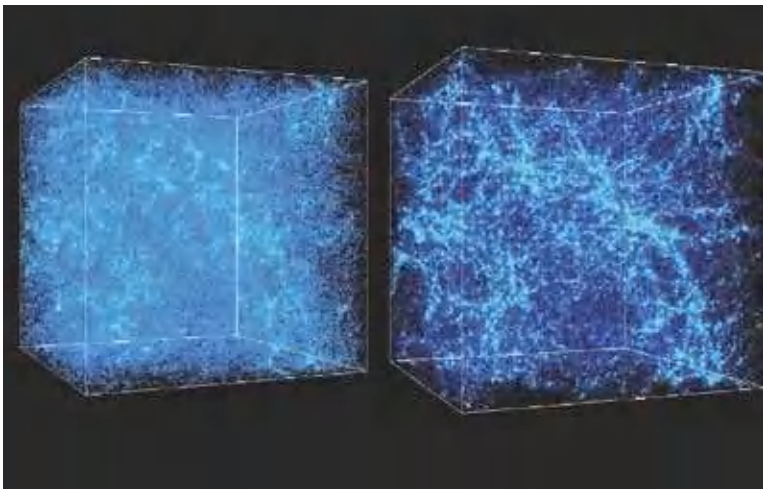
Bereits 1941 modellierte der schwedische Astronom Erik Homberg mit einem bemerkenswerten Analogrechner, den er aus Glühlampen und Fotozellen zusammengesetzt hatte, wie sich Galaxien zu Clustern zusammenballen. In den frühen 1960er Jahren untersuchte Sverre J. Aarseth von der University of Cambridge mit Hilfe digitaler Rechner, die damals gerade die analogen von der Bildfläche verdrängten, Cluster aus 25 bis 100 Galaxien.

Heute bewältigt die moderne Rechentechnik erheblich größere Modelle. Um die Jahrtausendwende konnten die Forscher schon die Bewegungen von einer Milliarde Objekte im Computer nachbilden (Spektrum der Wissenschaft 9/1999, S. 49). Im Jahr 2005 veröffentlichte Volker Springel vom Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching zusammen mit 16 Kollegen die Ergebnisse einer bahnbrechenden Simulation namens »Millennium Run« (Spektrum der Wissenschaft 11/2010, S. 34, und 12/2011 Extra, S. 10). Sie beruht auf dem ΛCDM-Modell und verfolgt mehr als zehn Milliarden Teilchen Dunkler Materie, die sich in einem Würfel mit einer Kantenlänge von mehr als zwei Milliarden Lichtjahren bewegen. Die Berechnungen überspannen den Zeitraum von zwölf Millionen Jahren nach dem Urknall bis zur Gegenwart.

In diesem dünnen Schnitt durch den Endzustand der Bolshoi-Simulation sind Anhäufungen von Teilchen, die durch Anziehungskräfte aneinander gebunden sind, durch Kreise und Quadrate gekennzeichnet. Diese »Halos« neigen dazu, sich ihrerseits zu größeren Strukturen zusammenzuballen. Sichtbare Galaxien kommen in dieser Simulation, die nur Dunkle Materie beschreibt, gar nicht vor; sie umfassen jeweils nur einen kleinen Teil eines Halos.



ANATOLY KLYPIN, NEW MEXICO STATE UNIVERSITY



In einem simulierten Universum entstehen aus einem fast homogenen Anfangszustand (links, etwa 100 Millionen Jahre nach dem Urknall) durch die gegenseitige Anziehung der Teilchen allmählich großräumige, fadenförmige Strukturen. Einige von ihnen durchziehen das gesamte Volumen (rechts der Endzustand, welcher der Gegenwart entspricht). Die Simulationsdaten haben Anatoly Klypin, einer der Leiter des Projekts Bolshoi, und sein Kollege Andrey V. Kravtsov mit einer Vorgängerversion von Bolshoi berechnet.

Leider basierten einige Daten für die Anfangsbedingungen auf frühen Resultaten des Satelliten WMAP, die später erheblich korrigiert werden mussten. Die Simulation Bolshoi ist etwas kleiner als Millennium Run, berechnet aber Positionen, Massen und Kräfte genauer. Außerdem verwendet sie aktuellere WMAP-Werte.

Die allgemeine Relativitätstheorie ist zwar die Grundlage der modernen Kosmologie; aber weder Millennium noch Bolshoi machen Gebrauch von ihr. Gravitation wird nicht als Verzerrung oder Krümmung der Raumzeit aufgefasst, sondern wie bei Newton schlicht als Kraft zwischen den Massen. Wie kann eine derart veraltete Physik akzeptable Ergebnisse liefern? Relativistische Methoden wären unverzichtbar, falls die Geschwindigkeiten der betrachteten Objekte der des Lichts nahekämen. Galaxien sind aber langsam. Sie erreichen nur wenige hundert Kilometer pro Sekunde, und dafür reichen die klassischen Gleichungen völlig aus.

Newton selbst hat bereits das Zweikörperproblem gelöst: Für den Fall, dass die Positionen, Geschwindigkeiten und Massen zweier punktförmiger Körper zu einem gewissen Zeitpunkt gegeben sind und die gegenseitige Gravitationsanziehung die einzige Kraft ist, die auf sie wirkt, konnte er ihre Bahnen für alle Zeiten berechnen, sowohl in der Vergangenheit als auch in der Zukunft. Das Dreikörperproblem dagegen überstieg bereits Newtons Möglichkeiten. Für das n-Körper-Problem mit $n > 3$ vermutete er, dass »die Bestimmung dieser Bewegungen durch exakte Gesetze, die ihre bequeme Berechnung gestatten, … die Kräfte des gesamten menschlichen Intellekts übersteigt«.

Zwei, drei, …, *n* Körper

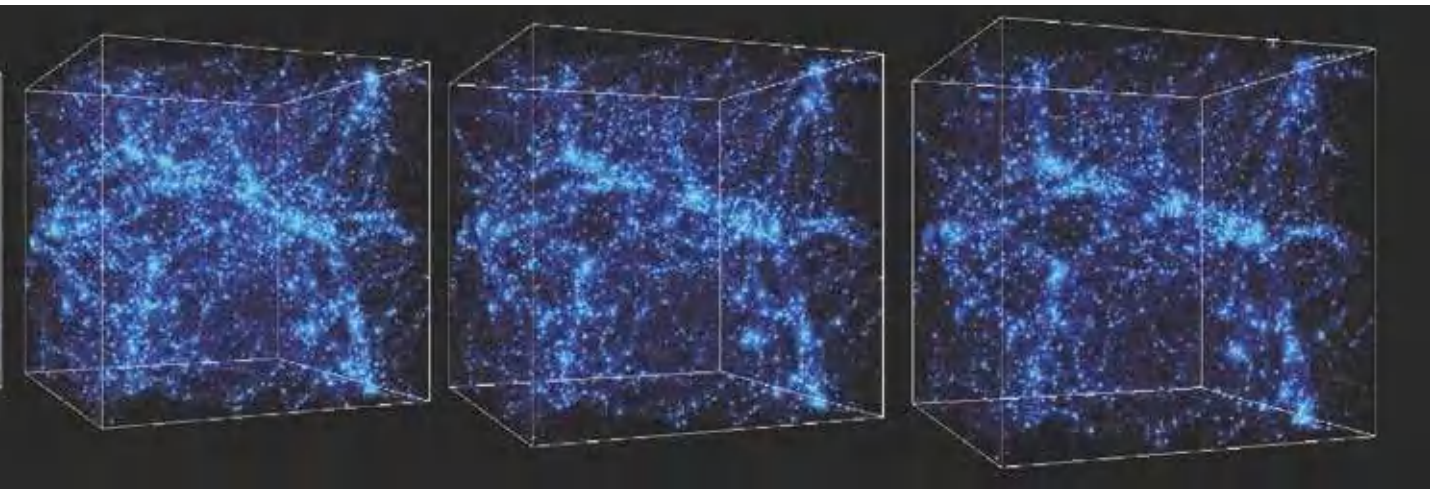
Mit dieser Einschätzung lag Newton richtig. Eine geschlossene mathematische Formel, welche die Positionen und Geschwindigkeiten aller n Punktmassen für alle Zeiten angäbe, ist schlicht undenkbar. Was man – mit genügend Rechenkapazität – finden kann, ist eine »fortschreitende« Lösung: Von einem gegebenen Anfangszustand aus lässt man alle Massenpunkte für eine kurze Zeit ihre Bahn entlangwandern und findet so den Zustand einen Augenblick später. Dabei hat man, um überhaupt rechnen zu können, zum Beispiel unterstellt, dass die Kräfte sich während dieser kurzen Zeitspanne nicht ändern. Wegen dieses Fehlers stimmt das Ergebnis nur näherungsweise; wenn man aber die Zeitabschnitte hinreichend kurz wählt, kommt man der richtigen Lösung erstaunlich nahe.

Wie berechnet man einen solchen Zeitschritt? Ausgangsdaten sind die Massen aller n Körper (die sich nicht ändern) sowie ihre räumlichen Koordinaten und Geschwindigkeiten zu einem Anfangszeitpunkt t_0. Auf jeden Körper wirken die Anziehungskräfte aller übrigen. Für die Körper mit den Nummern i und j ist der Betrag ihrer gegenseitigen Anziehungskraft nach Newton $F_{ij} = G m_i m_j / r^2$; dabei sind m_i und m_j die Massen beider Körper und r ihr Abstand. (Die allgemeine Gravitationskonstante G erscheint nicht explizit in den Berechnungen; man wählt die Einheiten von Masse und Länge so, dass $G = 1$ ist.) Die auf den Körper i wirkende Gesamtkraft ist die Summe aller Kräfte F_{ij} – die Vektorsumme wohlge-

Wie groß ist das Universum?

Nach aktuellen Schätzungen sind die Teile des Kosmos, deren Licht wir heute gerade noch empfangen können, 42 bis 47 Milliarden Lichtjahre von uns entfernt. Dieses Licht kann zwar nur 13,7 Milliarden Jahre unterwegs gewesen sein. Aber in der Zwischenzeit ist seine Quelle wegen der kosmischen Expansion von uns weggewandert, und zwar um über 30 Milliarden Lichtjahre, also mit mehr als der doppelten Lichtgeschwindigkeit. Das steht nicht im Widerspruch zur speziellen Relativitätstheorie, weil sich mit dieser Geschwindigkeit keine Materie bewegt hat, sondern nur der Raum expandiert ist.

In http://scienceblogs.com/startswithabang/2009/07/31/the-size-of-the-universe-a-har/ erläutert Ethan Siegel die Sache (auf Englisch) mit bildreichen Metaphern.



ANATOLY KLYPIN UND ANDREY V. KRAVTSOV, UNIVERSITY OF CHICAGO

merkt. Man muss auch die Richtung berücksichtigen, in der die Kräfte wirken; das ist für die Kraft F_{ij} die Richtung der Verbindungslinie zwischen den Körpern i und j. Insgesamt sind also $n(n-1)/2$ Kraftvektoren zu berechnen, eine für jedes Paar von Körpern.

Eine weitere Gleichung Newtons verbindet diese Gesamtkraft mit der Beschleunigung, die der Körper dadurch erfährt: $F = m\,a$. Ist die Beschleunigung eines Massenpunkts zu einem Zeitpunkt bekannt, so lässt sich daraus seine Geschwindigkeit kurze Zeit später berechnen und daraus wiederum seine Bahn für das kurze Zeitintervall Δt dazwischen. Dieser erste Verfahrensschritt ergibt die Geschwindigkeiten und Positionen der Körper zum Zeitpunkt $t_0+\Delta t$, die anschließend als Ausgangsdaten für den nächsten Rechenschritt dienen.

Kosmologische Simulationen des n-Körper-Problems arbeiten mit Werten für n im Bereich einiger Milliarden. Das läuft auf einen immensen Rechenaufwand hinaus. Für $n = 10^9$ Massenpunkte sind $n(n-1)/2 = 5 \cdot 10^{17}$ Kräfte zu berechnen – weit jenseits der Möglichkeiten auch der modernsten Supercomputer, von der Ausdauer eines Menschen ganz zu schweigen. Das oben beschriebene direkte Rechenverfahren kommt also nicht in Frage.

Was tun? Die Grundidee kommt aus der Elementarphysik. Man ersetze Gruppen eng benachbarter Körper durch jeweils einen einzigen mit der Summe der Massen und der Position im Schwerpunkt des Ensembles. Aus großer Entfernung ist die Kraft, die von dem fiktiven Körper ausgeübt wird, von der Summe der Einzelkräfte kaum zu unterscheiden. Wir fassen ja auch alle Atome der Erde zu einem einzigen Massenpunkt namens »Erde« zusammen. Das tut der Genauigkeit keinen Abbruch, wenn es um die Bahn der Erde im Sonnensystem geht. Nur bei der Bestimmung der Gezeiten zeigt die Näherung ihre Schwächen.

Diese Vergröberung des Systems bringt bei sehr geringem Verlust an Genauigkeit einen gewaltigen Zuwachs an Rechengeschwindigkeit. Wenn man es geschickt anstellt, sinkt der Rechenaufwand größenordnungsmäßig von $n(n-1)/2$ auf $n \log n$. Im Beispiel $n = 10^9$ sind das nur noch 10^{10} statt 10^{17} Rechenschritte; das macht einen Faktor zehn Millionen aus, entsprechend dem Unterschied zwischen einer Sekunde und vier Monaten Rechenzeit.

Aber Vorsicht! Diese Vereinfachung darf man nur für große Entfernungen anwenden. Für den »Nahverkehr« muss man auf die Einzelberechnung der Kräfte zurückgreifen. Um die beiden Fälle richtig zu unterscheiden, arbeitet die Simulation Bolshoi mit einem Algorithmus namens »adaptive refinement tree« (adaptiver Verfeinerungsbaum). Entwickelt haben ihn in den 1990er Jahren der heutige Projektleiter Klypin, Andrey V. Kravtsov, der inzwischen an der University of Chicago arbeitet, und Alexei M. Khokhlov vom U. S. Naval Research Laboratory.

Das intergalaktische Bolshoi-Ballett

Das Verfahren unterteilt zunächst den Raumwürfel, dessen Entwicklung simuliert werden soll, in kleinere, ebenfalls würfelförmige Zellen. Jede dieser »0-Zellen« kann wiederum in acht würfelförmige »1-Zellen« mit der halben Kantenlänge aufgeteilt werden, jede von diesen in acht »2-Zellen« und so weiter. Der Aufteilungsprozess wird so lange fortgesetzt, bis die Anzahl der Massenpunkte in jeder Zelle einen gegebenen Schwellenwert unterschreitet. Dabei dürfen verschiedene Regionen des Gesamtraums unterschiedlich fein unterteilt sein; so fallen aufwändige Berechnungen mit hoher Auflösung nur dort an, wo sie tatsächlich nötig sind.

Wenn ein Massenpunkt von einer größeren in eine kleinere Zelle wandert oder umgekehrt, wird die von ihm ausgehende Kraft anders falsch berechnet als zuvor. Damit das keine allzu störenden Auswirkungen hat, dürfen sich benachbarte Zellen höchstens um eine Größenklasse unterscheiden (Bild S. 98).

Bolshoi bearbeitet einen würfelförmigen Raumausschnitt mit einer Kantenlänge von ungefähr einer Milliarde Lichtjahren (Bild S. 96). Zum Vergleich: Der leuchtende Teil einer großen Galaxie ist typischerweise 100 000 Lichtjahre breit, der Durchmesser des beobachtbaren Universums beträgt

ungefähr 90 Milliarden Lichtjahre (Kasten S. 100). Das simulierte Volumen ist also groß genug, um Millionen von Galaxien zu enthalten, entspricht aber nur einem kleinen Bruchteil des sichtbaren Universums.

Der Würfel wird zunächst entlang jeder Raumrichtung in 256 Teile unterteilt; der adaptive Verfeinerungsbaum beginnt also mit 256^3 (16,8 Millionen) 0-Zellen. Die höchste zulässige Verfeinerungsstufe ist 10; die Kante einer 0-Zelle wird demnach in bis zu 2^{10}=1024 Teile zerlegt, so dass die kleinsten Zellen eine Kantenlänge von etwa 4000 Lichtjahren haben.

Evolution eines Universums

Was geschieht an den Rändern dieses willkürlich gewählten Raumausschnitts? Kein physikalischer Grund hindert einen Massenpunkt, über die Grenzen des Würfels hinauszuwandern; damit würde er aus dem simulierten Universum verschwinden. Man müsste zum Ausgleich irgendwie Massen von außen einströmen lassen oder den Würfel »innen verspiegeln«, also jeden Massenpunkt, der auf die Grenze gerät, einwärts reflektieren – alles sehr unphysikalische Notmaßnahmen. Die Autoren von Bolshoi verfielen auf eine ebenfalls unphysikalische, aber viel elegantere Lösung: periodische Randbedingungen. Verlässt ein Massenpunkt die Kiste auf der einen Seite, tritt er zugleich auf der entgegengesetzten wieder ein. Auch die Gravitationskräfte wirken so, als käme links von ganz links ganz rechts oder als bestünde das Universum aus unendlich vielen neben-, vor- und übereinandergesetzten Exemplaren desselben Simulationswürfels. Das ist eine gute Annäherung an einen homogenen, das heißt an jeder Stelle ungefähr gleich aussehenden Kosmos.

Demnach würde jeder Massenpunkt von seinen Ebenbildern in den Nachbarwürfeln angezogen, ganz zu schweigen davon, dass auch alle anderen Massen unendlichfach vorkommen. Damit derlei Unfug nicht die Rechenzeit hochtreibt, haben die Autoren einen »long-range cut-off« eingeführt: Oberhalb einer Entfernung von einer halben Würfelbreite werden keine Gravitationskräfte mehr berechnet; auf diese große Entfernung sind sie ohnehin von null kaum zu unterscheiden. Es gibt auch einen »short-range cut-off«. Kräfte auf sehr kurze Entfernung werden ebenfalls nicht berechnet, aber nicht weil sie zu klein, sondern weil sie zu groß wären. Wenn sich zwei Massenpunkte sehr nahe kommen, beeinflussen sie sich sehr heftig, aber nur für sehr kurze Zeit, weil sie durch die starke Beschleunigung alsbald wieder auseinandergetrieben werden. In der Simulation würde eine solche Beschleunigungsspitze über einen ganzen Zeitschritt hinweg wirken, also viel zu lang, und dadurch zu völlig falschen Ergebnissen führen.

Der Bolshoi-Würfel wird von 2048^3 (das sind 8 589 934 592) identischen Objekten bevölkert. Das ist ziemlich viel für das Computerprogramm, das ihre Wege zu verfolgen hat, aber kläglich wenig gemessen am Original. Jedes dieser Objekte, von den Programmierern verniedlichend »Teilchen« (particles) genannt, entspricht ungefähr 200 Millionen Sonnenmassen. Wegen dieser Größe hat es auch keinen Sinn, zwischen baryonischer und Dunkler Materie zu unterscheiden: Alle Teilchen der Simulation sind Dunkle Materie. In der Entwicklung des echten Universums haben sich ohnehin zuerst Halos aus Dunkler Materie gebildet und dann erst in deren Innerem die Galaxien. Da schadet es nicht, dass die Galaxien selbst überhaupt nicht explizit repräsentiert werden.

Zu Beginn der Berechnungen sind die reichlich acht Milliarden Teilchen fast gleichmäßig im Würfel verteilt, das heißt, ihre Dichte schwankt nur wenig. Das beschreibt ungefähr den Zustand des Universums nach der inflationären Phase, nicht lange nachdem die letzte kosmische Hintergrundstrahlung ausgesandt wurde. Die Simulation beginnt bei einem Alter des Universums von etwa 23 Millionen Jahren und durchläuft bis zur Gegenwart ungefähr 400 000 Rechenschritte, deren jeder etwa 34 000 Jahren entspricht. In Abständen von 40 bis 80 Millionen Jahren wird der Zustand des simulierten Systems gespeichert (»Schnappschuss«; Bild S. 100/101).

Die Berechnungen liefen auf dem Computer »Pleiades« am Ames Research Center der NASA in Kalifornien. In der Liste der 500 leistungsfähigsten Supercomputer der Welt steht Pleiades auf Platz 11 (Spektrum der Wissenschaft 10/2012, S. 90). Bolshoi nutzt 13 824 Prozessorkerne und 13 Terabyte Speicherplatz.

Mit dem Simulationslauf sind die Berechnungen noch nicht beendet. Bei der anschließenden Datenanalyse sucht zunächst ein Programm namens »halo finder« Bereiche erhöhter Dichte, in denen die Teilchen durch ihre Anziehungskräfte gebunden sind. Dichtespitzen zu finden, ist der leichte

W I S wissenschaft in die schulen!

Didaktische Materialien für den Unterricht zum Thema »Modelle des Universums, kosmische Inflation« kostenfrei herunterladen unter:

www.wissenschaft-schulen.de/universum

Michael Teuber
Professioneller Radrennfahrer und mehrfacher Paralympics-Sieger

Um mehr über Michael Teuber zu erfahren, scannen Sie den QR-Code mit der entsprechenden App Ihres Smartphones oder gehen Sie direkt auf www.focus-entscheider.de/teuber

AUFGEBEN IST NICHT.

Das Entscheidende im FOCUS

Teil der Aufgabe; da aber die Teilchen sich in einem Halo wie die Bienen in einem Schwarm bewegen, ist es schwierig zu entscheiden, welche von ihnen tatsächlich dazugehören und welche nur durchreisende Gäste sind.

Alle Daten der Simulation, einschließlich der Schnappschüsse, Halokataloge und Verschmelzungsbäume, welche die Herausbildung der Halos zeigen, sind über die Datenbank »MultiDark« frei zugänglich.

Wie sieht das Bolshoi-Universum aus, und wie unterscheidet es sich von der Welt, wie wir sie wahrnehmen? Bereits zu Beginn der Simulation entwickeln sich etwa fünf Millionen Halos. Später, wenn sich weitere Teilchen unter dem Einfluss ihrer Anziehungskraft zusammenballen, wächst ihre Zahl auf zwölf Millionen. Auch ganze Halos unterliegen denselben Anziehungskräften und tendieren dazu, miteinander zu verschmelzen. Dadurch bilden sich weniger, dafür aber größere Ansammlungen heraus (Bild S. 99). Am Ende der Berechnungen bleiben etwa zehn Millionen Halos übrig; viele von ihnen werden als »Subhalos« klassifiziert, weil sie zwar innerhalb anderer Halos existieren, aber eine gewisse Eigenständigkeit bewahren. Ihre Größe variiert von 10^{10} (entsprechend einer kleinen Galaxie) bis zu 10^{15} Sonnenmassen (großer Galaxiencluster).

Diesen Simulationsbefund müssen die Forscher nun mit der Wirklichkeit vergleichen. Entsprechende Arbeiten haben gerade erst begonnen, etwa an Statistiken über Satellitengalaxien. Die Milchstraße besitzt zwei bekannte Satelliten, die Große und die Kleine Magellansche Wolke am südlichen Sternenhimmel. Beobachtungsdaten aus dem Sloan Digital Sky Survey lassen darauf schließen, dass diese Situation vergleichsweise selten vorkommt. Unter den Galaxien mit vergleichbarer Masse haben nur etwa zehn Prozent zwei solche Begleiter. Eine Untersuchung der Bolshoi-Ergebnisse durch Michael T. Busha und seine Kollegen zeigt ähnliche Werte. Auch für die Häufigkeit von Galaxien mit nur einem oder gar keinem Satelliten stimmen die Ergebnisse der Modellrechnung und die echten Daten gut überein.

Leider gilt das nicht für jeden Vergleich von Modell und Realität. Sebastian Trujillo-Gomez und seine Kollegen haben echte und simulierte Galaxien beziehungsweise deren Halos im Hinblick auf ihre Rotationsgeschwindigkeit verglichen – eine Größe, die eng mit der Gesamtmasse und der Helligkeit einer Galaxie zusammenhängt. Für den größten Teil der Werte stimmen die relativen Häufigkeiten gut überein; allerdings sagt Bolshoi eine zu geringe Anzahl von Galaxien mit der maximalen Rotationsgeschwindigkeit voraus. Noch beunruhigender ist eine Diskrepanz am unteren Ende der Skala. Die Simulation ergibt eine Zahl an Zwerggalaxien, die den beobachteten Wert um den Faktor zehn übersteigt.

Für diese Abweichung gibt es bisher keine Erklärung, aber mehrere Hypothesen. So könnte die Simulation schlicht fehlerhaft sein. Oder es gibt tatsächlich so viele Zwerggalaxien, aber auf Grund einer unerkannten systematischen Verzerrung der Beobachtungsdaten sehen wir nur jede zehnte von ihnen. Oder die Theorie ist revisionsbedürftig: Vielleicht ist die Dunkle Materie im All nicht kalt, sondern lauwarm. Sollte sich diese letzte Vermutung erhärten, stehen wir möglicherweise kurz vor einer weiteren großen Veränderung unserer kosmischen Vorstellungen.

Brunos Vermächtnis

Vor 400 Jahren war die Erkenntnis, dass die Erde die Sonne umkreist und nicht umgekehrt, nicht nur ein wissenschaftlicher Durchbruch, sondern vor allem ein Kulturschock. Die Menschen wurden genötigt, ihre Vorstellung von der Welt, in der sie leben, grundlegend zu verändern. Das war nicht immer willkommen; es wurden Bücher verbrannt und im Fall Giordano Brunos auch der Verfasser.

Heute dagegen scheinen kosmologische Revolutionen kaum eine Spur im öffentlichen Bewusstsein zu hinterlassen. Kosmische Inflation, Dunkle Materie, Dunkle Energie – diese Ideen fordern auch von uns, die Vorstellung von der Welt zu revidieren. Außerhalb der Wissenschaftlergemeinschaft hat sich aber kaum jemand darüber aufgeregt. Das ist beruhigend für die Kosmologen; sie müssen nicht mehr um ihr Leben fürchten. Sind wir aber tatsächlich liberaler und offener als früher – oder vielleicht nur gleichgültig? ~

DER AUTOR

Brian Hayes ist Verfasser der Kolumne »Computing Science« im »American Scientist«, aus dem dieser Artikel stammt. In seinem Blog http://bit-player.org präsentiert er unter anderem ergänzendes Material zu seinen Kolumnen.

QUELLEN

Busha, M.T. et al.: Statistics of Satellite Galaxies around Milky way-Like Hosts. Preprint, 2010. http://arxiv.org/abs/1011.6373

Gottlöber, S., Klypin, A.A.: The ART of Cosmological Simulations. In: Wagner, S. et al. (Hg.): High Performance Computing in Science and Engineering. Springer, Berlin 2009, S. 29–44

Klypin, A.: Numerical Simulations in Cosmology. In: Bonometto, S. (Hg.): Modern Cosmology. Institute of Physics, Philadelphia 2002, S. 420–473

Klypin, A. A. et al.: Dark Matter Halos in the Standard Cosmological Model: Results from the Bolshoi Simulation. In: Astrophysical Journal 740, 102, 2011. Online unter http://hipacc.ucsc.edu/Bolshoi/Papers.html

Kravtsov, A.V. et al.:. Adaptive Refinement Tree: A New High-Resolution *n*-Body Code for Cosmological Simulations. In: Astrophysical Journal Supplement 111, S. 73–94, 1997. Online unter http://arxiv.org/abs/astro-ph/9701195

Riebe, K. et al.: The MultiDark Database: Release of the Bolshoi and Multi-Dark Cosmological Simulations. Preprint, 2011. http://arxiv.org/abs/1109.0003

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: **www.spektrum.de/artikel/1168634**

© American Scientist
www.americanscientist.org

Tim Flach
Ganz nah
Porträts von Tieren
Aus dem Englischen von Christa Broermann und Elsbeth Ranke. Knesebeck, München 2012. 312 S., € 68,–

FOTOGRAFIE

Tierbilder als Kunstwerke

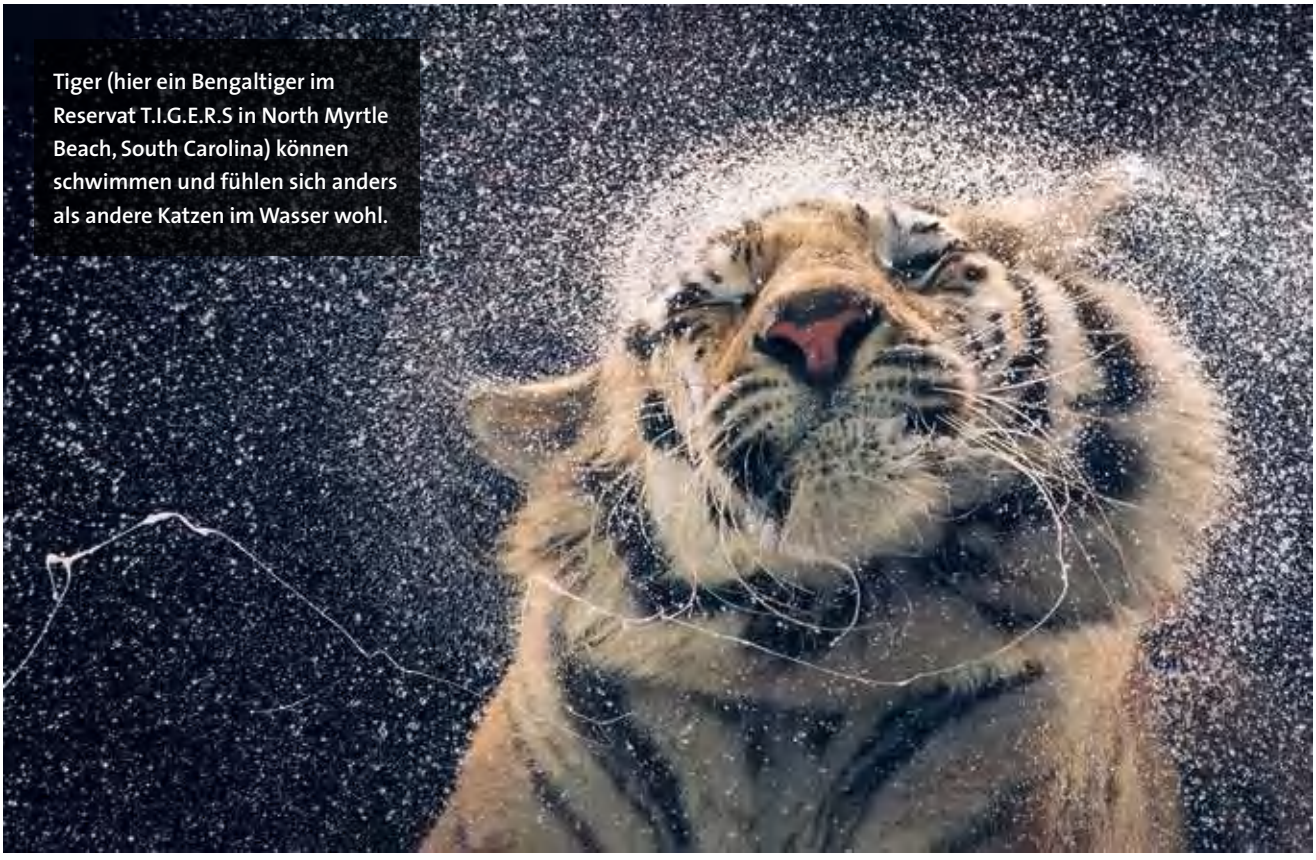
Viele der Porträts sind überaus beeindruckend – selbst wenn man nicht versucht, sie mit Tiefsinn aufzuladen.

Tim Flach ist ein vielfach preisgekrönter britischer Fotograf; im deutschen Sprachraum ist er durch seine Bildbände »Equus« (2008) und »Hunde« (2010) bekannt geworden. In seinem neuen Werk bildet er nicht nur eine Tierart ab, sondern alles, was nicht menschlich ist; der Originaltitel »More than Human« trifft die Sache, während entgegen dem deutschen Titel nicht nur Nahaufnahmen zu finden sind.

Die beeindruckendsten Fotos sind die Detailaufnahmen der Menschenaffen. Es rührt den Betrachter unmittelbar an, wie die Schimpansenmutter ihrem Kind die Hand küsst, der alte Affe die gleichen Fingernägel zeigt wie ein alter Gärtner nach einem arbeitsreichen Tag oder der Weißschulterkapuzineraffe so sorgfältig mit seinen Fingern arbeitet, als würde er gerade seine E-Mails auf dem Smartphone checken. Gleiches gilt für den selbstzufriedenen Panda auf dem Titelbild, den schwarzen Panter, der sich genüsslich die Pfote leckt, und den nachdenklichen Löwen, der im vollen Bewusstsein seiner Macht sogar ein freundliches Lächeln für den Betrachter aufbringt.

Die Aufnahmen von den Flughunden, die mit dem Kopf nach unten hängend zu ruhen pflegen, hat Tim Flach einfach umgedreht – sozusagen auf die Füße gestellt. Und auf einmal glaubt man Herrn und Frau Flughund beim Ehekrach zu sehen, einen galanten Herrn, der einer Dame sein Geleit anbietet, und ein Mädchen, das schüchtern den Blick abwendet.

Natürlich interpretiert der Betrachter diese menschlichen Seelenregungen in die Tiere hinein. Genau das macht Tim Flach in der Einleitung zum Thema: Es sei wichtig und kontrovers, wie der Anthropozentrismus »unsere Wahrnehmung der Welt und ihrer Bewohner formt, verzerrt und in Frage stellt …« und: »Obwohl mir klar ist, dass man bei der Konstruktion solcher Bilder nicht neutral bleiben kann, hoffe



Tiger (hier ein Bengaltiger im Reservat T.I.G.E.R.S in North Myrtle Beach, South Carolina) können schwimmen und fühlen sich anders als andere Katzen im Wasser wohl.

ich doch, dass die Arbeiten neutral präsentiert werden.«

Andere Bilder wollen nicht zum Anthropozentrismus passen. Die Meerwalnuss, eine Qualle, die durch die Eroberung des Schwarzen Meers auf Kosten der ansässigen Fischpopulationen von sich reden machte, fasziniert durch ihren farbenprächtig-durchsichtigen Körper, die japanische Kompassqualle durch ihre anmutig tanzenden, bis zu drei Meter langen Tentakel und der Flughund durch seine ausgebreiteten, durchscheinenden Flughäute. Der weiße Pudel, der so künstlich geschoren ist wie die bizarr geformten Sträucher des englischen Gartens Leven's Hall im Hintergrund, und der Afghane mit dem langen, glatten, gescheitelten Haupthaar sehen aus, als wären sie einem Reklamebild entsprungen. Wirklich ganz nah sind die ausdrucksvollen, von Fell umgebenen Augen – die sich als die Augenflecken des Nachtfalters *Gynanisa maja* entpuppen.

Ein roter Faden lässt sich in dem Buch nicht wirklich finden. Tim Flach will uns dazu anregen, über das Verhältnis des Menschen zu »den anderen Arten« nachzudenken. Das misslingt, weil der Betrachter so mit den Bildern und den atemberaubenden Details beschäftigt ist, dass er sich nicht zusätzlich noch philosophische und ethische Gedanken macht. Da helfen auch die erklärenden Texte nicht viel. Ja, die gestochen scharfen Aufnahmen der tanzenden, zur leichteren Verarbeitung federlos gezüchteten Hühnern und der auf Steakausbeute optimierten Muskelprotzbullen schockieren. Vielleicht ist es ja übertrieben, wenn wir die Tiere, die wir essen, obendrein noch niedlich finden wollen. Aber ich halte nichts davon, dass Tim Flachs Koautor Lewis Blackwell in dem zugehörigen Text implizit die Gentechnik verharmlost.

Der erste Eindruck ist in der Tat fantastisch. Erst bei näherer Betrachtung fallen vermeidbare Schwächen auf. So verschwinden manchmal wichtige Teile eines doppelseitigen Bilds im Falz, was den künstlerischen Eindruck stark beeinträchtigt. Manche Übergänge von einem Thema zum nächsten sind sehr abrupt, und neben den erstklassigen Bildern fallen etliche »nur« gute merklich ab. Am Ende stellt sich das Preis-Leistungs-Verhältnis dann doch als unbefriedigend heraus.

Frank Thommen

Der Rezensent ist Diplombiologe und arbeitet als IT Support Engineer beim Europäischen Laboratorium für Molekularbiologie (EMBL) in Heidelberg.

Charles Duhigg
Die Macht der Gewohnheit
Warum wir tun, was wir tun
Aus dem Englischen von Thorsten Schmidt.
Berlin Verlag, Berlin 2012. 416 S., € 22,99

PSYCHOLOGIE

Etwas bewegen

Charles Duhigg erklärt auf sehr amerikanische Weise, wie man Gewohnheiten durchschauen, ändern und nutzen kann.

Charles Duhigg, ein renommierter Wirtschaftsredakteur bei der »New York Times«, hat sich für sein erstes Buch ein wahrhaft alltägliches Thema gewählt – und ist damit prompt auf Platz 10 der amerikanischen Bestsellerliste gelandet. Es geht um die Handlungs-, Emotions- und Denksequenzen, die nach einem immer gleichen Muster ablaufen und uns dadurch das Leben erleichtern.

Hirnforscher haben festgestellt, dass Gewohnheitsschleifen im Wesentlichen durch die Basalganglien im Hirnstamm ausgeführt werden. Damit sind sie dem Bewusstsein entzogen. In dem Moment, in dem eine Gewohnheit anspringt, beschäftigt sich die Großhirnrinde nicht mehr mit ihr und kann ihre Kapazitäten effektiver für andere Dinge nutzen.

Unser ganzes Leben besteht zu einem großen Teil aus Gewohnheiten. Die meisten sind gut, ja sogar überlebensnotwendig, da sie unser Gehirn vor permanenter Überforderung schützen. Manche wirken sich allerdings sogar schädlich aus, und es ist nicht einfach, sie loszuwerden. Entsprechend erklärt uns der Autor auch, wie man Herr seiner eigenen Gewohnheiten werden und sich diejenigen anderer zu Nutze machen kann.

Für sein Buch hat der Autor Professoren, Wirtschaftsbosse und Betroffene interviewt und unzählige Forschungsberichte von Unternehmen sowie wissenschaftliche Publikationen aus der Psychologie und der Neurologie durchforstet. Anhand zahlreicher Beispiele beleuchtet er neben individuellen Gewohnheiten diejenigen großer Gruppen und ganzer Gesellschaften. Schließlich stellt er die Frage, inwieweit wir für unser gewohnheitsmäßiges Handeln selbst verantwortlich sind.

Laut Duhigg gibt es immer einen spezifischen Auslösereiz, der eine Routinehandlung in Gang bringt. Diese läuft dann automatisch ab, ohne dass man darüber nachdenken muss. Am Ende steht die erwartete Belohnung. Das Verlangen nach derselben ist der Motor der Gewohnheit.

Wer also eine schlechte Gewohnheit ändern will, muss nur den Auslösereiz erkennen, die Belohnung und das zu Grunde liegende Verlangen identifizieren und schließlich die Routine durch eine weniger schlechte ersetzen. Dazu noch ein selbst erstellter Plan, feste Entschlossenheit und der Glaube an den eigenen freien Willen, und schon klappt's! Dieses Rahmenmodell kann

man sich auch übersichtlich in Form eines Flussdiagramms von Duhiggs Website http://charlesduhigg.com herunterladen. Natürlich ist es nicht immer ganz so einfach, wie es sich liest, aber das gibt der Autor selbst auch zu.

Um eine neue Gewohnheit zu entwickeln, gilt es eine neue Belohnung zu finden und ein Verlangen danach auszubilden. Das muss nicht unbedingt der Mensch selbst tun, der sich vielleicht auf diesem Weg eine neue Routine zulegen will.

Dass Zähneputzen zu einer täglichen Ritualhandlung wurde, verdanken wir der Marketingstrategie eines Zahnpastaherstellers. Die neue Zahnpasta enthielt ätherische Öle, die ein angenehmes Frischegefühl hinterließen. Der unangenehme »Zahnfilm« (Auslösereiz) konnte durch regelmäßiges Putzen (neue Routine) beseitigt werden. Die Belohnung war das Frischegefühl im Mund, das der zugehörige Mensch mit Sauberkeit gleichsetzte. Das Verlangen danach war der Motor der neuen Gewohnheit, die nebenbei die Verkaufszahlen in die Höhe trieb.

Es reicht allerdings oft nicht aus, nur eine neue Gewohnheit zu etablieren, um eine alte zu ändern, sagt Duhigg. Entschlossenheit, Überzeugung und der Glaube, es zu schaffen, seien wesentliche Voraussetzungen für einen dauerhaften Erfolg. Und den erreiche man in einer Gemeinschaft besser als allein. So erklärt der Autor den Erfolg der Anonymen Alkoholiker. Auch Willenskraft und Tugendhaftigkeit bezeichnet er als erlernbare Gewohnheiten.

»In manchen krisenhaften Situationen ist es günstiger, die Angst weiter zu schüren, als sie abebben zu lassen«

Gewisse Gewohnheiten wirken, einmal etabliert, über sich hinaus und sind geeignet, das ganze Leben positiv zu verändern. Duhigg nennt als Beispiele: morgens die Betten zu machen, abends gemeinsam zu essen oder ein Haushaltsbuch zu führen. Nur sind diese »Schlüsselgewohnheiten« nicht einfach und vor allem nicht im Voraus als solche zu erkennen.

Das Buch ist weit mehr als nur ein persönlicher Ratgeber. Es gibt Einblicke, wie Gewohnheiten in größeren Gruppen funktionieren und wie man sie für seine Ziele steuern kann. Der Autor zeigt, wie man durch geschickte Manipulation der Gewohnheiten anderer nicht nur deren Kaufverhalten beeinflussen, sondern auch Footballteams zum Sieg bringen, Unternehmen zum Erfolg führen und Glaubensgemeinschaften oder politische Bewegungen gründen kann. Besonders wenn »lose Bindungen« (soziale Netzwerke) und starke freundschaftliche Bande miteinander verschmelzen, würden große gesellschaftliche Veränderungen möglich.

Krisen seien oft Wendepunkte für solche Veränderungen. Deshalb sei es mitunter günstiger, die Angst vor einer

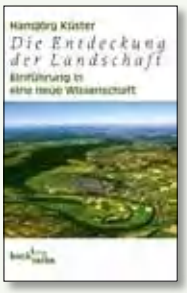
ANZEIGE

Unabhängige
Deutsche Universitätszeitung
Wissenschaft weiterdenken

Holen Sie sich alle wichtigen Infos aus Hochschule und Wissenschaft:

duz.de
duz-wissenschaftskarriere.de

Hintergrundinfos · Nachrichten · Empfehlungen und die besten Jobs
für Nachwuchswissenschaftler, Fach- und Führungskräfte aus Hochschule und Wissenschaft



Hansjörg Küster

Die Entdeckung der Landschaft. Einführung in eine neue Wissenschaft

C.H.Beck, München 2012. 362 S., € 17,95

Der Autor, Pflanzenökologe am Institut für Geobotanik der Universität Hannover, besticht wieder einmal mit einem lesenswerten, inhaltsreichen Buch, in dem er geologisch-geografische und biologisch-ökologische mit natur- und kulturhistorischen Gegebenheiten und Entwicklungen verbindet. Er betrachtet hierbei vor allem die letzten 10 000 Jahre und räumt besonders Manipulationen durch den Menschen viel Platz ein. Landschaftsforschung ist zwar eine junge Disziplin innerhalb der Kulturwissenschaften, erfordert laut Küster jedoch unbedingt Experten mit naturwissenschaftlicher Ausbildung. Der kleine Band kann durchaus als erste Einführung in dieses junge Fachgebiet dienen, eignet sich aber auch einfach zum Schmökern für alle, die gern mehr über die menschliche Siedlungsgeschichte und deren heute noch vorhandene Spuren erfahren möchten. ADELHEID STAHNKE

Anna Frebel

Auf der Suche nach den ältesten Sternen

S. Fischer, Frankfurt am Main 2012. 352 S., € 19,99

Die deutsche Astrophysikerin Anna Frebel war gerade erst Mitte 20, als sie den Stern mit dem niedrigsten bekannten Eisengehalt entdeckte. Seither forscht sie an den renommiertesten Universitäten, derzeit als Assistant Professor für Physik am MIT in Cambridge, Massachusetts (USA). In ihrem Buch erklärt sie, was extrem metallarme Sonnen über den Kosmos verraten. Wie Frebel darlegt, gehören diese Objekte zu den ältesten bekannten Sternen, und ihre Untersuchung liefert wichtige Hinweise darauf, wie sich die chemische Vielfalt des Kosmos entwickelt hat. Das Buch gibt einen erhellenden Einblick in die Astrophysik der Sterne und die Geschichte des Universums. An einigen Stellen neigt die Autorin dazu, sich in Details zu verlieren. Dafür streut sie immer wieder Schilderungen von persönlichen Erlebnissen ein, die für Abwechslung beim Lesen sorgen. FRANK SCHUBERT

Andreas Heuer

Der perfekte Tipp. Statistik des Fußballspiels

Wiley-VCH, Weinheim 2012. 321 S., € 24,90

Ein Tor beim Fußball ist ein relativ seltenes Ereignis; deswegen hängt der Ausgang eines Spiels nicht nur von den Fähigkeiten der beiden Mannschaften, sondern auch vom Glück ab. Das ist gut für alle Beteiligten, denn dadurch bleibt die Sache spannend. Andreas Heuer, im Hauptberuf Professor für physikalische Chemie in Münster, hat durch umfangreiche statistische Analysen die Ergebnisse vieler Fußballspiele in einen vorhersagbaren und einen – größeren – zufallsabhängigen Anteil zerlegt. Zu ersterem zählen naheliegende Größen wie die Spielstärke einer Mannschaft und der Heimvorteil (siehe Spektrum der Wissenschaft 6/2010, S. 68). In seinem Buch analysiert Heuer darüber hinaus Größen wie den Marktwert eines Spielers, den Effekt einer Trainerentlassung und die Brauchbarkeit der von Zeitschriften wie »kicker« vergebenen Schulnoten. Alles in einer wohltuenden Mischung aus sachlicher Korrektheit und lebendiger Beschreibung. CHRISTOPH PÖPPE

Thomas Martin, Wighart von Koenigswald, Gudrun Radtke, Jes Rust (Hg.)

Paläontologie. 100 Jahre Paläontologische Gesellschaft

Friedrich Pfeil, München 2012. 192 S., € 24,90

Die Paläontologische Gesellschaft gibt zu ihrem 100. Geburtstag eine Festschrift heraus – und stellt dabei nicht etwa die Paläontologen prominent heraus, sondern ihre Forschungsgegenstände. Eine gute Entscheidung! Der Bildband präsentiert fast 100 bedeutende Fossilien mit zum Teil beeindruckenden ganzseitigen Fotos. Die Auswahl reicht von mikroskopischen Einzellern bis zum größten Dinosaurierskelett der Welt, das im Berliner Museum für Naturkunde zu sehen ist. Die knapp einseitigen Erläuterungstexte sind von Wissenschaftlern verfasst, die mit den Fundstücken vertraut sind, und größtenteils mit Literaturangaben versehen. Die Texte sind zwar kurz, aber überaus gehaltvoll – harte Kost für den Unkundigen, zu wenig für den Appetit des wirklich Wissbegierigen. Aber als schöner Bildband zum Blättern und Einstieg für den ernsthaft Interessierten ist das Buch vorbehaltlos zu empfehlen. ELKE REINECKE

Krise weiter zu schüren, als sie abebben zu lassen. Kluge Führungskräfte würden demnach bewusst nach Krisenmomenten suchen oder eine Krisenwahrnehmung erzeugen, wenn sie etwas verändern wollten. Wenn solche Weisheiten an Universitäten gelehrt werden, wen wundert es da noch, dass eine Finanzkrise die nächste jagt?

Das Buch ist gespickt mit zahlreichen Fallbeispielen, die so fesselnd geschrieben sind, dass man es kaum aus der Hand legen kann. Vor lauter Geschichten muss man allerdings aufpassen, dass man die Essenz des Buchs nicht verpasst – die hätte vermutlich auf zehn Seiten mühelos Platz gefunden. Zwischendurch kann es auch mal nerven, wenn man die Sachinformation immer nur häppchenweise und unterbrochen durch lange, amerikanische Erfolgsstorys serviert bekommt.

Dieses Buch erfüllt sämtliche Klischees eines amerikanischen Bestsellers. Dennoch ist es insgesamt gesehen durchaus ein Lesevergnügen und darüber hinaus interessant für alle, die etwas bewegen wollen.

Tanja Neuvians
Die Rezensentin hat in Medizin und Tiermedizin promoviert und arbeitet als freie Wissenschaftsjournalistin in Ladenburg.

Bernhard Kegel
Ein tiefer Fall
Mare, Hamburg 2012. 508 S., € 19,90

ROMAN

Im Strudel der Lüge

Aus Betrugspraktiken in der Wissenschaft macht Bernhard Kegel einen spannenden Krimi.

Beim Schreiben eines Fachartikels schläft der Kieler Biologieprofessor Hermann Pauli vor dem Computer ein. Mitten in der Nacht wecken ihn Geräusche, und dann tropft auch noch Wasser von der Decke. Als er nachsieht, findet er im obersten Stockwerk des Instituts eine Leiche – ausgerechnet in den Arbeitsräumen des gefeierten Starwissenschaftlers Frank Moebus. Wenig später wird ein zweiter Toter entdeckt; auch er gehörte zu Moebus' Arbeitsgruppe. Die Polizei steht vor einem Rätsel. Hat der Fall etwas mit den urtümlichen Zellen zu tun, die Moebus in der Tiefsee aufgespürt hat und mit denen er weltweit für Schlagzeilen sorgte?

Bewegung kommt in die Sache, als prominente Forscher einen offenen Brief an Moebus schreiben. Darin werfen sie ihm vor, er überlasse ihnen trotz wiederholter Bitten keine Proben der Zellen: ein klarer Verstoß gegen gute wissenschaftliche Praxis. Neugierig geworden, beginnt Hermann Pauli mit Nachforschungen, zumal die Polizei wenig Interesse für die fachlichen Hintergründe erübrigt. Die wissenschaftlichen Veröffentlichungen aus Moebus' Arbeitsgruppe werfen Fragen auf. Warum war ein unerfahrener Doktorand damit befasst, das Erbgut der Tiefseezellen zu entschlüsseln? Welcher Art ist das merkwürdige Verhältnis zwischen Moebus und seinen Mitarbeitern? Gibt es einen Zusammenhang zwischen all diesen Dingen? In Pauli keimt ein unheimlicher Verdacht. Als er später ein Laborbuch aus der Gruppe findet, werden selbst seine schlimmsten Befürchtungen weit übertroffen.

In seinem neuesten Wissenschaftskrimi erzählt der promovierte Biologe und vielfach ausgezeichnete Autor Bernhard Kegel eine fesselnde Geschichte über Betrug in der Wissenschaft. Die Handlung des Romans ist frei erfunden, aber von echten Fälschungsskandalen inspiriert – etwa dem des koreanischen Stammzellforschers Hwang Woo-Suk, des deutschen Physikers Jan Hendrik Schön oder der Krebsforscher Friedhelm Herrmann und Marion Brach. Mit gut aufeinander abgestimmten Handlungssträngen, überzeugend gezeichneten Charakteren und einem Spannungsbogen, der sich bis zum Ende durchzieht, bereitet Kegel das Thema packend und verständlich auf. Dabei verbindet er erzählerische Fülle gekonnt mit dem Sinn fürs Wesentliche.

»Ein tiefer Fall« knüpft lose an Kegels ebenfalls lesenswerten Roman »Der Rote« an. Man muss diesen aber nicht kennen, um vom neuen Krimi fasziniert zu sein. Kegel gelingt es sehr gut, die Welt der Wissenschaft zu skizzieren, ohne dabei in ermüdende Erklärungen zu verfallen. Wohldosiert, eingebettet in die Krimigeschichte und diese sinnvoll ergänzend vermittelt er Fachwissen, Denkweisen, Hierarchien und Gepflogenheiten des Forschungsbetriebs. Wissenschaft erscheint hier weder als selbstverliebte Eigenschau noch als klischeehafte Beschreibung von außen, sondern als kenntnisreich geschilderte Tätigkeit von Menschen, die Stärken und Schwächen haben. Ein empfehlenswertes Buch, das auch Laien ohne Weiteres in den Bann ziehen kann.

Frank Schubert
Der Rezensent ist promovierter Biophysiker und Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

Chaos und Turbulenz

Forscher versuchen, die Geheimnisse des Chaos zu ergründen, in dem turbulente Prozesse eine zentrale Rolle spielen. Mit ausgefeilter Mathematik und Simulationen analysieren sie nicht nur entsprechende Vorgänge in Wolken und Strömungen, sondern auch in biologischen Abläufen.

DREAMSTIME / VITALIY STAVINOV

GERALD SLOTA

Mord im Schlaf

Manchmal verüben Schlafwandler Gewalttaten, bis hin zum Mord. Forscher verstehen zunehmend, was das Gehirn bei abgeschaltetem Bewusstsein vermag – und was nicht. Damit gelingt es heute oft, schuldhafte Taten bei vorgeblichem Schlafwandel von wirklich unverschuldeten zu unterscheiden.

ARNOLD FELIX, DAI

Paradiese auf Erden

Wohlduftende Blumen, kühlende Wasserläufe – so besangen Dichter die maurischen Gärten im mittelalterlichen Spanien. Archäologische Untersuchungen zeichnen ein nüchterneres Bild, das neue Fragen aufwirft: Kannten die Mauren bereits die Gesetze der Perspektive?

Gammablitze aus den Wolken

Dass Gewitter Gammastrahlung produzieren, wissen Physiker seit 20 Jahren. Doch ihre Theorien zur Entstehung der extrem energiereichen Strahlung wurden immer wieder von neuen Messungen widerlegt. Nun aber scheinen sie dem Rätsel auf die Spur zu kommen.

Der Geist als Beweger

Gelähmte, die ihre künstlichen Gliedmaßen bloß mit der Kraft ihrer Gedanken steuern – das ist keine Sciencefiction mehr. Schon in wenigen Jahren könnte eine Ganzkörperprothese die verlorene Beweglichkeit komplett ersetzen.

NEWSLETTER

Möchten Sie regelmäßig über die Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?

Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:
www.spektrum.com/newsletter

Die Geschenkidee* für junge Wissenschaftler!

* Spektrum NEO jetzt auch im Abo:
Für alle Kinder zwischen 10 und 14 Jahren, die nicht nur das »Was«, sondern auch das »Wie« und »Warum« interessiert.
4 Ausgaben für nur € 5,50 pro Heft.
(Das Abo ist jederzeit kündbar)

Als Dank für Ihre Bestellung erhalten Sie ein Präsent Ihrer Wahl!

Bestellen Sie jetzt für Ihr Kind!

www.spektrum-neo.de/abo

AcademiaNet

Das Rechercheportal für
herausragende Wissenschaftlerinnen

AcademiaNet ist ein einzigartiger Service für Entscheidungsträger aus Wissenschaft und Industrie ebenso wie für Journalisten und Veranstalter von Tagungen und Kongressen. Hier finden Sie hochqualifizierte Akademikerinnen, die neben ihren hervorragenden fachlichen Qualifikationen auch noch Führungserfahrung und Managementfähigkeiten vorweisen können.

AcademiaNet, das europäische Rechercheportal für herausragende Wissenschaftlerinnen, bietet:

- Profile hochqualifizierter Akademikerinnen aller Fachrichtungen – ausgewählt von Vertretern renommierter Wissenschaftsorganisationen und Industrieverbänden
- Individuelle Suchmöglichkeiten nach Fachrichtungen, Arbeitsgebieten und weiteren Kriterien
- Aktuelle redaktionelle Beiträge zum Thema »Frauen in der Wissenschaft«

Robert Bosch Stiftung

Spektrum der Wissenschaft

nature

Eine Initiative der Robert Bosch Stiftung in Zusammenarbeit mit Spektrum der Wissenschaft und der nature publishing group

www.academia-net.org

Spektrum DER WISSENSCHAFT EXTRA

Spektrum DER WISSENSCHAFT

WISSENSCHAFT VERSTEHEN

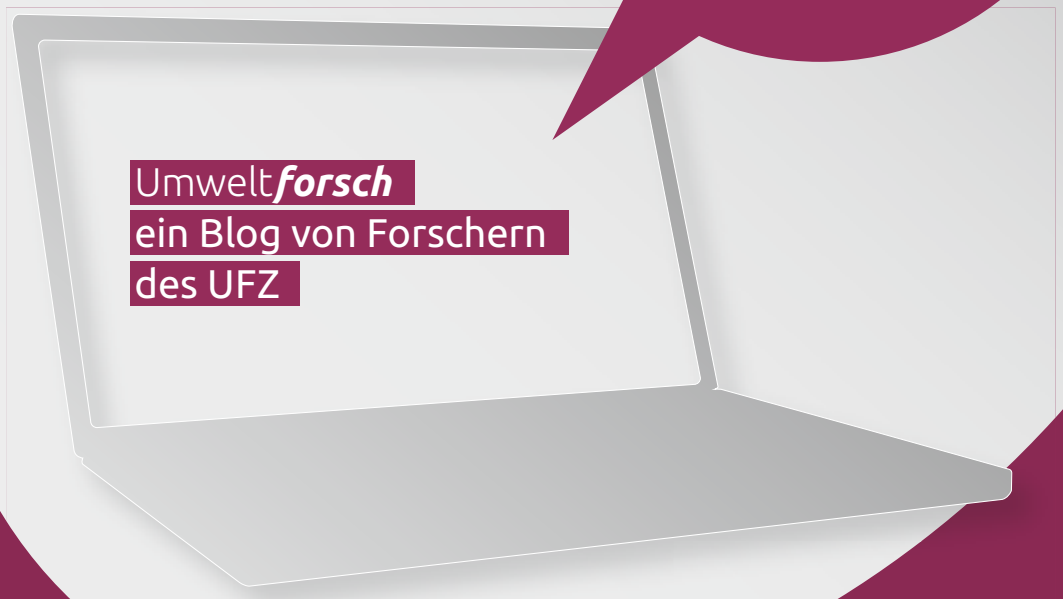
Die Preisträger 2012

Eine Kooperation von Spektrum DER WISSENSCHAFT und HELMHOLTZ ZENTRUM FÜR UMWELTFORSCHUNG UFZ

ERSCHIENEN IM DEZEMBER 2012

SciLogs

Diskutieren Sie mit – auf unserem Portal für Wissenschaftsblogs!



Umwelt***forsch***
ein Blog von Forschern
des UFZ

In Umwelt***forsch*** schreiben Sozial- und Naturwissenschaftler vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) in Leipzig über Mensch und Natur unter dem Einfluss des globalen Wandels. Ihnen geht es um die interdisziplinäre Diskussion zur Überwindung komplexer Umweltprobleme. Dabei sind sie oft Grenzgänger zwischen den sozial- und naturwissenschaftlichen Welten.

SciLogs.de/umweltforsch

Joachim Schüring
Redaktionsleiter
schuering@spektrum.com

Verehrte Leserinnen und Leser!

Das sonntägliche Kaffeekränzchen im Kreis der Familie gerät für den angehenden Wissenschaftler nicht selten zu einer ernst zu nehmenden Herausforderung. Denn fast so schlimm wie die Fragen zum Vortrag vor großem Fachpublikum sind die von Tante Hilde und Onkel Detlef bei Kuchen und Konfekt. Man habe ja nun schon so lange studiert – und noch immer keine richtige Anstellung: »Was machst du denn da jetzt eigentlich noch so lange an der Uni?«

In diesem Fall gibt es zwei Strategien. Erstens, man referiert aus dem Projektantrag und spricht von Dioxygenasen, die die posttranslationale Hydroxylierung von Aminosäure-Seitenketten während der Kollagensynthese katalysieren. Das klingt klug, birgt aber die Gefahr, dass die Verwandtschaft den Jungforscher peinlich findet und fortan meidet.

Oder man sagt, zweitens, dass es in der Arbeit um die Wirkung bestimmter Unkrautvernichtungsmittel auf die Umwelt gehe. Und dass man dafür im Labor untersuche, ob diese Substanzen, nachdem sie den Disteln den Garaus gemacht haben, im Boden von Bakterien rasch genug abgebaut werden – damit sie das Grundwasser nicht gefährden. Derart nützliches Tun wird sich in der Verwandtschaft herumsprechen und für Lob und Anerkennung sorgen.

So ist es im Kleinen wie im Großen: Mikro- und Makrokosmos des Wissenstransfers vom Labor in die Öffentlichkeit gleichen sich. Deshalb gibt es Tage der offenen Tür, deshalb verzichtet kaum eine Universität, kaum ein Forschungsinstitut auf starke Presseabteilungen.

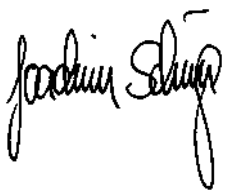
Natürlich geht es hier um Selbstdarstellung und Wettbewerbsvorteile – etwa im Konkurrenzkampf um öffentliche Fördermittel. Aber es geht auch um das Verhältnis des einzelnen Wissenschaftlers zu seiner Arbeit. Angesichts der immer spezielleren Themen stellt sich die Frage, ob man sich in den vier Wänden des Labors einigeln will. Oder ob man eben wegen dieser zunehmenden Spezialisierung wieder mehr Distanz zu seinem Thema anstrebt und nach den größeren Zusammenhängen sucht – etwa im Rahmen multidisziplinärer Projekte. Wenn Chemiker und Physiker mit Raumplanern und Sozialwissenschaftlern in ein und demselben Projekt am gleichen Strang ziehen müssen, geht ohne Kommunikation über den Tellerrand hinaus gar nichts.

Dass diese nicht nur lästige Pflicht sein muss, zeigen beispielhaft die seit einigen Jahren überaus erfolgreichen Wissenschaftsblogs, in denen Forscher den Dialog sowohl mit Kollegen anderer Fachrichtungen als auch mit interessierten Laien suchen. Dank der Möglichkeiten des Internets entstehen dabei völlig neue Ideen und bis dahin nie geahnte Kooperationen!

Auch Aktionen wie die vielerorts stattfindenden Science Slams oder der vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung gemeinsam mit »Spektrum der Wissenschaft« ausgerufene Wettbewerb »Wissenschaft verstehen« sind beredte Beispiele dafür, dass Wissenschaftskommunikation vor allem auch Spaß macht – mindestens so viel wie ein Kaffeekränzchen.

Ich freue mich über den Erfolg der jungen Autoren in diesem Heft und wünsche Ihnen bei der Lektüre viel Freude!

Ihr



Inhalt

03 Editorial

06 Wissenschaftler ins Netz!
Ein Plädoyer für Wissenschaftskommunikation

08 »Das kann man nicht delegieren«
Interview mit Annette Leßmöllmann

10 Iris Kröger will etwas gegen sommerliche Mückenplagen tun. Dabei setzt sie ganz auf die Hilfe von Wasserflöhen.

14 Helge Gößling nutzt die leistungsfähigsten Computer der Welt – um zu berechnen, woher der Regen kommt.

18 Ulrich Bohrn züchtet lebende Zellen auf Schaltkreisen. Sein Zellchip könnte der perfekte Sensor für Luftschadstoffe werden.

22 Katja Heubach ist davon überzeugt, dass die Artenvielfalt in der afrikanischen Savanne einen hohen ökonomischen Wert hat.

26 Benjamin Creutzfeldt misst winzige Veränderungen der Schwerkraft – und verfolgt so den Kreislauf des Wassers im Untergrund.

30 Susan Schamfuß untersucht, wie Bakterien mit Hilfe von Pilzen dorthin gelangen, wo sie Schadstoffe im Boden abbauen können.

34 Der »Küchenzuruf«

TITELMOTIV (JEWEILS VON LINKS NACH RECHTS):
OBEN: ANDRÉ KÜNZELMANN, UFZ [M]; MIKE BECKERS [M]; THORSTEN NAESER [M];
UNTEN: RUDI FEUSER [M]; KAROLINE WOLF [M]; ANDRÉ KÜNZELMANN, UFZ [M]

»Erklärt uns eure Arbeit so, dass wir sie verstehen. Begeistert uns!«

WISSENSCHAFT VERSTEHEN

Mit diesem Aufruf richteten sich das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ in Leipzig und »Spektrum der Wissenschaft« an junge Forscherinnen und Forscher, die sich mit umweltrelevanten Themen auseinandersetzen.

An dem alle zwei Jahre stattfindenden Wettbewerb »Wissenschaft verstehen« können Mediziner, Raumplaner und Sozialwissenschaftler genauso teilnehmen wie Ökologen, Klimaforscher oder Physiker. Wichtigste Voraussetzung: Die Bewerber wollen in spannender und allgemein verständlicher Art und Weise über ihre Arbeit berichten. Dazu müssen sie ihr Thema von einem Standpunkt aus betrachten, den sie zuvor vielleicht noch nie eingenommen hatten: dem des Laien.

Wer mitmachen will, sollte mindestens ein Jahr an seiner Dissertation arbeiten oder den Doktortitel seit höchstens zwei Jahren in der Tasche haben.

Die eingereichten Beiträge umfassen rund 9000 Anschläge und werden von einer Jury beurteilt. Die sechs besten erscheinen in der Reihe »Spektrum der Wissenschaft EXTRA«.

Das Finale der diesjährigen Runde, die Kür der Siegerin oder des Siegers, findet am 3. Dezember 2012 um 17.00 Uhr im Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ in Leipzig statt. Dort haben die Kandidaten der Endrunde Gelegenheit, ihre Arbeiten einem großen Publikum vorzustellen. Jeder Zuhörer ist herzlich willkommen. Eintritt ist frei.

Wer an diesem Abend den besten Vortrag präsentiert, erhält einen Scheck über 3000 Euro. Platz zwei und drei werden mit 2000 beziehungsweise 1000 Euro prämiert. Die vierten Plätze gehen mit einem Preisgeld von 500 Euro nach Hause.

Der Wettbewerb wird unterstützt von: Sparkasse Leipzig, MITGAS-Mitteldeutsche Gasversorgung GmbH, Bauer Umwelt GmbH, Leipziger Stiftung für Innovation und Technologietransfer, Agilent Technologies, Verein der Freunde und Förderer des UFZ.

Jury

- **Mario Beck**
  Wissenschaftsredakteur der »Leipziger Volkszeitung«
- **Dr. Jörg Junhold**
  Direktor des Zoo Leipzig
- **Nora Liebmann und Cornelius Penno**
  Schüler der 12. Klasse des Wilhelm-Ostwald-Gymnasiums, Leipzig
- **Dr. Claudia Schreiner**
  Programmchefin Kultur / Wissenschaft des Mitteldeutschen Rundfunks
- **Prof. Dr. Beate A. Schücking**
  Rektorin der Universität Leipzig
- **Dr. Joachim Schüring**
  Redaktionsleiter, Spektrum der Wissenschaft Verlag, Heidelberg
- **Prof. Dr. Georg Teutsch**
  Wissenschaftlicher Geschäftsführer des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung – UFZ, Leipzig

Wissenschaftler ins Netz!

Warum müssen Forscher über ihre Arbeit reden? Weil sie heute mehr denn je die Möglichkeiten haben, gehört zu werden. Und weil es heute mehr denn je nötig ist. Lars Fischer kommentiert die Bedeutung von Wissenschaftskommunikation in der Gesellschaft des 21. Jahrhunderts.

Unter den Dingen, die gute Wissenschaft ausmacht, hatte das Heraustragen von neuen Ideen in die Welt schon immer seinen festen Platz neben Forschung, Lehre und der Veröffentlichung der Ergebnisse. In der Vergangenheit sind viele große Wissenschaftler auch durch ihre Publikumsvorträge berühmt geworden – man denke an Justus von Liebig oder Richard Feynman. Doch Professionalisierung und Spezialisierung auf der einen Seite und der enorme Wandel in den Medien und dem Verhalten ihrer Nutzer auf der anderen Seite haben dazu geführt, dass Gesellschaft und Wissenschaft sich auseinandergelebt haben, dass Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sich überwiegend, abgekoppelt von der Allgemeinheit, nurmehr untereinander von ihren Ergebnissen berichten.

Doch das kann so nicht bleiben, schon aus ganz pragmatischen Gründen: Die Gesellschaft braucht fachliche Expertise. Dringend. Zu vielen wichtigen gesellschaftlichen Themen haben Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen etwas zu sagen, haben ungewohnte Einsichten zu bieten und ihre eigene Perspektive einzubringen. Auch Forscher sind

»Wissenschaftler dürfen heutzutage nicht mehr warten, bis jemand bei ihnen anklopft – der Kampf um die Deutungshoheit ist dann nämlich schon entschieden«

Bürger, deren Stimmen im Diskurs einer demokratischen Gesellschaft nicht fehlen dürfen. Die großen Fragen unserer Zeit, ob es um Ressourcen geht, um Klimawandel, Energie oder Infektionskrankheiten, sind ohne Expertise nicht zu beantworten; Katastrophen wie die Havarie von Fukushima erfordern wissenschaftliche Expertise, wenn man die Folgen beseitigt, und ebenso, wenn es darum geht, vergleichbare Unfälle zu verhindern.

Um gehört zu werden, müssen Forscher und Experten heutzutage mehr denn je sichtbar sein, und im Ringen um Aufmerksamkeit stehen sie im Wettbewerb nicht nur mit Unterhaltungsmedien, sondern auch und gerade mit Gruppen und Ideologien, die sich als Ersatz, sogar als bessere Alternative zur Wissenschaft anpreisen, wie Esoteriker oder Kreationisten. Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen können und dürfen heutzutage nicht mehr warten, bis jemand bei ihnen anklopft – der Kampf um die Deutungshoheit ist dann nämlich schon entschieden, oft zu Ungunsten der Forscher.

Sichtbar sein ist denn auch das Stichwort, um das es geht. Erklären, und vor allem erklären können. Beides bedingt einander: Wer nie erklären musste, kann es, wenn es hart auf hart kommt, erst recht nicht, sei es bei einer Naturkatastrophe oder im Hörsaal, wenn es gilt, den Nachwuchs auszubilden. Diese Art der Kommunikation kommt ja nicht als zusätzliche Anforderung neu hinzu, viel passender ist das Bild vom verlorenen Sohn, der endlich heimkehrt. Erklären ist der Hauptberuf von Forscherinnen und Forschern; Forschung bedeutet, Welterklärungen zu suchen. Die Welt erklären, und zwar allen, die es wissen wollen.

Und gerade jetzt explodieren förmlich die Möglichkeiten, das zu tun: Eine neue Medienrevolution macht plötzlich jeden zum potenziellen Publizisten, gleichzeitig haben sich neue Formate der direkten Begegnung etabliert wie die langen Nächte der Wissenschaften, Science Slams oder Kinderunis. Stiftungen und Wettbewerbe schreiben sich auf die Fahne, Forschung in die Öffentlichkeit zu bringen. Selten war die Gelegenheit, den Austausch mit Laien zu suchen, so günstig wie heute.

Die Bedeutung der Wissenschaft für den Alltag, die Gesellschaft und unser Verständnis unserer selbst und unserer Position in der Welt ist viel zu groß, als dass Wissenschaftler darauf verzichten könnten, ihre Arbeit und ihre Erkenntnisse an die Allgemeinheit zu vermitteln. Es geht eben nicht nur darum, zu konkreten Fragen und Risiken Stellung zu beziehen oder diese und jene Technik zu erklären. Wissenschaft ist längst zentraler Teil unserer Kultur, was man ja auch daran erkennt, wie routinemäßig – oft verballhornte oder falsch verstandene – Argumentationsmuster aus der Wissenschaft in alltägliche Debatten einfließen. Es geht auch immer weniger um den eindimensionalen naturwissenschaftlichen Vortrag, sondern darum, Themen aufzunehmen und zu diskutieren. So wie die Wissenschaft in alle Teile der Gesellschaft hineinwirkt, muss auch die Gesellschaft in die Wissenschaft zurückwirken können, denn beide sind inzwischen untrennbar miteinander verbunden, im Guten wie im Schlechten.

Diese neuen Möglichkeiten zum Dialog sollten Forscherinnen und Forscher freudig nutzen, denn Dialog gehört zur Wissenschaft. Seit Jahrzehnten bringen Journalisten und Magazine die Neuigkeiten von der Forschungsfront zu Millionen begeisterten Lesern, machen wissenschaftliche Entdeckungen wie das Higgs-Boson Schlagzeilen rund um den Globus. Und das ist erst der Anfang einer neuen Wissensgesellschaft des 21. Jahrhunderts. Ihre wichtigsten Bestandteile sind eine offene und zugängliche Wissenschaft und all jene Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, die ihr schon jetzt den Weg bereiten.

> Lars Fischer ist Chemiker und Redakteur bei den SciLogs.

Sein Blog: www.scilogs.de/fischblog

»Das kann man nicht delegieren«

Im Interview mit »Spektrum der Wissenschaft« spricht Annette Leßmöllmann, Professorin für Journalistik mit dem Schwerpunkt Wissenschaftsjournalismus an der Hochschule Darmstadt, über Strategien zur Kommunikation von Forschung – und die Gefahren der Medienlandschaft.

Frau Leßmöllmann, warum sollten sich Wissenschaftler heutzutage mit Wissenschaftskommunikation beschäftigen?

Wenn wir Wissenschaftskommunikation als »Kommunikation mit der Öffentlichkeit« definieren, dann gibt es dafür eine Reihe Argumente. Zum Beispiel das Steuerzahlerargument: Die Bürger haben ein Anrecht darauf, zu wissen, was in der von ihnen finanzierten Forschung passiert. Ich finde diese Argumentation zwar etwas platt, weil sie nach einem Austausch »Geld gegen Wissen« klingt, und so einfach ist es nicht. Aber es ist nicht von der Hand zu weisen, dass die Öffentlichkeit einen berechtigten Anspruch hat. Viel wesentlicher ist allerdings, dass Kommunikation ein entscheidender Bestandteil der Wissenschaft selbst ist. Einerseits kommen Forscher und Forscherinnen gar nicht umhin, untereinander ihre Ergebnisse auszutauschen und zu diskutieren. Es ist natürlich auch für die individuelle Forscherkarriere unabdingbar, innerhalb der Wissenschaft effektiv zu kommunizieren. Aber damit ist es nicht getan, denn Wissenschaft wirkt automatisch in die Gesellschaft hinein, in Form von Technik, aber auch von Ideen. Das heißt, die Öffentlichkeit ist in den weiteren wissenschaftlichen Prozess ebenso involviert wie die Fachkollegen, und sie wirkt ebenfalls auf die Wissenschaft zurück. Deswegen sollten Forscher auch in dieser Richtung den Dialog suchen.

Warum können Forscher diese Aufgabe nicht den Pressesprechern und Journalisten überlassen?

Zum Teil können sie das, keine Frage. Aber das klingt so, als könne man das Kommunizieren insgesamt delegieren. Das kann man aber nicht, denn Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler müssen auch das Kommunizieren mit ihren Pressestellen und mit Journalisten trainieren. Denn diese Kanäle haben ihre Besonderheiten, die durchaus vorgeben, auf welche Weise man Inhalte vermitteln kann und welche überhaupt vermittelbar sind. Hinzu kommt, dass zum Beispiel Journalisten sehr wohl Interessen haben, die nicht mit denen von Wissenschaftlern übereinstimmen müssen – das sieht man schon daran, wie oft Wissenschaftler die journalistische Berichterstattung über Wissenschaftsthemen kritisieren. Man muss diese Kommunikationswelten verstehen, um sinnvoll mit ihnen umgehen zu können. Vor allem aber ist diese Art der Kommunikation nicht nur sehr indirekt, sondern oft auch eine Einbahnstraße. Fragen und Bedenken der Adressaten erreichen die Wissenschaftler bestenfalls verspätet oder gar nicht. Diese Form der kontrollierten Kommunikation bricht spätestens dann zusammen, wenn mal etwas passiert. In einer Krise, sei es wenn in der Forschung selbst etwas schiefgeht, sei es bei einer Katastrophe wie in Fukushima, haben Forscher gar keine Wahl mehr – sie werden gefragt. Und dann ist es zu spät, erst einmal die nötige Erfahrung in der Kommunikation zu sammeln.

Wie kann man sich als Forscher diese Fähigkeit zur Kommunikation aneignen?

Auch da gibt es sehr unterschiedliche Möglichkeiten, die ersten Schritte zu wagen. Natürlich kann man einfach losgehen, einen Blog eröffnen und gucken, wie die Resonanz sich entwickelt, oder sich bei Twitter und Facebook profilieren. Aber der Sprung ins kalte Wasser ist nicht für jeden etwas. Zum Glück gibt es eine ganze Reihe Formate, in denen Wissenschaftler innerhalb eines verlässlichen Rahmens und gegebenenfalls mit Unterstützung durch professionelle Kommunikatoren die ersten Schritte machen können, zum Beispiel in Form eigener Artikel in Forschungsmagazinen, aber eben auch in Publikumsvorträgen zu besonderen Anlässen. Zudem existieren heute Institutionen und Stiftungen, die Wissenschaftler auf ihrem Weg in die Öffentlichkeit unterstützen, und zusätzlich kann man die eigene Pressestelle wegen solcher Projekte ansprechen.

Welche Instrumente sollten Forscher und Forscherinnen wählen, um direkt mit der Öffentlichkeit zu kommunizieren?

Da gibt es keine allgemein gültigen Wahrheiten. Am besten ist es sicher, verschiedene Sachen auszuprobieren und herauszufinden, was einem am ehesten liegt. Die vielen

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MIKE BECKER

Für gekonnte und bewusste Kommunikation plädiert Annette Leßmöllmann im Gespräch mit Lars Fischer von »Spektrum der Wissenschaft«. Die Hochschullehrerin will Wissenschaftler dazu motivieren, den richtigen Umgang mit den Medien zu üben. Und warnt zugleich: »Plumpe PR für die eigene Forschung wird nicht funktionieren.«

digitalen Kommunikationsmittel, Blogs und Social Media etwa sind ausgezeichnet dafür geeignet, und Wissenschaftler sollten sich mit diesen Kanälen zumindest einmal beschäftigt haben. Aber auch die traditionelleren Formen der Öffentlichkeitsarbeit wie Publikumsvorträge oder Tage der offenen Tür darf man dabei nicht vernachlässigen – im Gegenteil, diese Veranstaltungen werden heute wieder beliebter, zum Beispiel in Form der Langen Nächte der Wissenschaften in vielen Städten.

Ist es dann nicht Aufgabe der Universitäten, angehenden Wissenschaftlern Kurse in Kommunikation anzubieten?

Definitiv ja. Selbst wenn Wissenschaftler sich dagegen entscheiden, selbst zu kommunizieren, sollten sie eine Vorstellung davon haben, wie die Medienlandschaft aussieht, welche Akteure über Wissenschaft berichten und vor allem welche Instrumente sie verwenden und welche Interessen sie dabei haben. Forscher sind im Umgang mit Medien oft ungeübt und machen deswegen leicht vermeidbare Fehler, wenn sie irgendwann gezwungenermaßen in der Öffentlichkeit stehen. Deswegen wären derartige Veranstaltungen, am besten Pflichtseminare im Studium, unbedingt wünschenswert.

Wo liegen die Probleme solch offener Kommunikation, und wie geht man damit um?

Für Wissenschaftler ist das zuallererst eine Zeitfrage – die Zeit, die man auf solche Aktivitäten verwendet, fehlt einem für andere Dinge, die der eigenen wissenschaftlichen Arbeit zuerst einmal förderlicher sind. Man muss sich allerdings klarmachen, dass Kommunikation ein integraler Bestandteil der Wissenschaft ist. Besonders deutlich sieht man das bei der universitären Lehre, die ja auch Kommunikation ist – wer hier Zeit einsetzt, knapst sie von seiner Forscherkarriere ab. Aber wenn kein Wissenschaftler mehr lehrt, ist die Wissenschaft selbst am Ende. Mit der Kommunikation nach außen ist es im Grunde ähnlich: Natürlich ist es in gewisser Weise riskant, offen zu kommunizieren. Aber nicht zu kommunizieren ist es mindestens ebenso. Man stelle sich eine Welt vor, in der kein Forscher mehr Austausch mit der Öffentlichkeit pflegte. Daraus entstünde eine Kaste von Wissenden, die etwas weiß, was niemanden sonst interessiert – und andersherum kreist dann auch die Wissenschaft nur um sich selbst.

Wieso wäre das ein Problem?

Vielleicht sehen das manche als Vorteil, sich nur mit Wissenschaft und mit sonst nichts zu befassen. Ich kann das sogar ein bisschen verstehen, es ist ja auch eine Frage der Neigung. Und wer nur um sich selbst kreist, der läuft auch nicht Gefahr, Dinge lediglich deshalb zu erforschen, weil sie für Schlagzeilen sorgen – denn das ist der Fallstrick der »Medialisierung der Wissenschaft«. Eine zu starke Ausrichtung auf den Medieneffekt birgt die Gefahr, wirklich relevante Fragestellungen zu unterdrücken. Und was wirklich relevant ist, sollte nicht nur das Mediensystem festlegen dürfen. Also: Kommunikation – ja, aber gekonnt und bewusst. Plumpe PR für den eigenen Forschungsbereich wird nicht funktionieren. Eine wahrhaft offene Kommunikation, die kritische Stimmen der Öffentlichkeit akzeptiert und nicht diffamiert – das ist gut für alle. »Kommunikation« sollte weniger im Sinne von »ich bin auf Sendung und ergieße Weisheit über die Menschen« aufgefasst werden, sondern als Dialog im Sinne eines Gesprächs: »Ich stelle meine Erkenntnisse zur Debatte und schaue mal, was dabei herauskommt.« Das ist eigentlich eine genuin wissenschaftliche Tätigkeit. Wieso diese Gesprächsform also nicht nur mit der Kollegin im Labor nebenan pflegen, sondern auch mit dem interessierten Laien?

In Weihern und Tümpeln fühlen sich Stechmückenlarven wohl. Das will Iris Kröger ändern, indem sie konkurrierenden Teichbewohnern einen Vorteil im Rennen um Platz und Nahrung verschafft. Regelmäßig filtert und zählt sie die Larven aus Wasserproben und erfährt so, ob ihre Strategie erfolgreich war.

Iris Kröger

ANDRÉ KÜNZELMANN, UFZ

Tatort Pfütze – Wasserflöhe im Kampf gegen Mückenplagen

Ein kräftiger Sommerregen, und die nächste Invasion von Stechmücken steht bevor. Als effektives Gegenmittel erweisen sich natürliche Nahrungskonkurrenten – doch nur, wenn sie Starthilfe aus dem Labor erhalten.

Sie verleiden uns die sommerlichen Grillabende und rauben uns den Schlaf. In vielen anderen Teilen der Welt jedoch sind Stechmücken nicht nur lästig, sondern auch gefürchtete Krankheitsüberträger. Exotische Arten gelangen im Zuge der Globalisierung und Klimaerwärmung zunehmend in unsere Breiten – und übertragen hier womöglich gefährliche Krankheiten aus ihrer tropischen Heimat.

Im Kampf gegen die Mücken zeigt die Erfahrung, dass chemische Insektizide oft auch für zahlreiche andere Lebewesen verheerend sind. Wünschenswert wären gezielte biologische Methoden, vielleicht sogar mit Hilfe von Verbündeten aus dem Tierreich: eine Mückenpolizei, die etwas gegen die Plagegeister unternimmt.

Solche Helfer könnten winzige Krebse sein. Sie kommen in Tümpeln und Pfützen in einer immensen Artenvielfalt vor. Die Larven der Stechmücke wachsen ebenfalls in solchen Gewässern heran und treffen dort auf Blattfußkrebse, Ruderfußkrebse, Muschelkrebse und Co. Sie besiedeln nicht nur dieselben Lebensräume, sie fressen auch das Gleiche, nämlich kleine organische Partikel wie Algen oder Bakterien, die sie aus dem Wasser filtern.

Lässt sich diese Konkurrenz eventuell zur Mückenbekämpfung nutzen? Zur Beantwortung der Frage untersuchte ich, was passiert, wenn Larven der Gemeinen Stechmücke *(Culex pipiens)* und Wasserflöhe *(Daphnia spp.)* aufeinandertreffen. Dazu beobachteten meine Kollegen und ich einen Sommer lang das Leben in verschiedenen Gewässern.

Vor allem seichte Tümpel interessierten uns, die nicht selten mehr als 100 Quadratmeter groß werden, dabei aber nur knöcheltief sind und im Sommer innerhalb weniger heißer Wochen restlos austrocknen. Ein kräftiger Regenguss füllt sie wieder und gibt gewissermaßen den Startschuss für die Besiedlung dieses neuen Gewässers durch Mücken und Wasserflöhe. Welche der beiden Arten würde das Rennen für sich entscheiden? Könnten wir den Krebstieren so gute Startbedingungen geben, dass sie uns im Kampf gegen Mückenplagen unterstützen?

Wir stellten fest: Langfristig überlebten auch ohne menschliches Eingreifen in den Gewässern nur die Wasserflöhe. In jenen Tümpeln, in denen es viele von ihnen gab, fehlte es den Mückenlarven schlicht an Platz und Nahrung. Die Krebse gewannen offenbar den Kampf um die Ressourcen.

ANDRÉ KÜNZELMANN, UFZ

Und instinktiv erahnen das wohl auch die Weibchen der Gemeinen Stechmücke. Sie suchten sich für die Eiablage nämlich gezielt solche Gewässer aus, in denen keine Wasserflöhe vorkamen. Wie die Mückenweibchen das erkennen, bleibt vorerst ihr Geheimnis. Man weiß aber bereits aus Laborversuchen, dass sie vor der Eiablage das Teichwasser trinken und so zum Beispiel die Anwesenheit räuberischer Insekten bemerken. Vermutlich verändern die Bewohner die chemische Zusammensetzung des Wassers. Wahrscheinlich schmecken die Mücken, dass sich Krebse in ihrer Nähe aufhalten.

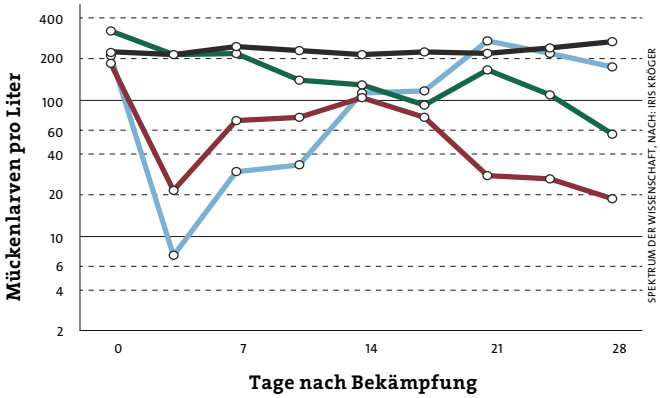
Wasserflöhe könnten demnach gleich auf zweifache Weise gegen die lästigen Blutsauger wirken. Zum einen stören sie die Eiablage der Mückenweibchen. Zum anderen entwickeln sich die wenigen Larven, die doch ins Wasser gelangen, wegen der Konkurrenz schlechter. Bräuchte man also nur Wasserflöhe in die Teiche und Tümpel zu setzen? Ganz so einfach ist es dann wieder nicht, denn die Mücke hat einen entscheidenden Vorteil: Sie ist schnell!

Um das zu verstehen, müssen wir zunächst die Frage klären, wie Mückenlarven und Wasserflöhe in die Tümpel gelangen. Bei Ersteren ist das einfach. Nach einem Regenguss suchen erwachsene Stechmückenweibchen gezielt nach Wasserstellen, um mehrere hundert Eier auf einmal abzulegen. Die Larven schlüpfen nach wenigen Tagen, so dass das Wasser rasch von vielen tausenden Exemplaren bevölkert wird.

Die Krebstierchen haben es da schwerer. Sie können nicht fliegen oder aktiv zu neuen Ufern streben. Sie reisen nur als blinde Passagiere, etwa im Gefieder von Wasservögeln. Allerdings produzieren Wasserflöhe so genannte Dauereier, die Kälte, Hitze und Trockenheit überstehen – jahrelang. Sobald sie ins Wasser gelangen, schlüpfen die Larven binnen weniger Tage. Die Weibchen benötigen daraufhin noch etwa ein bis zwei Wochen, ehe sie fortpflanzungsfähig sind, und produzieren danach alle drei Tage rund 30 Nachkommen.

Die Anzahl der Wasserflöhe ist in einem Gewässer also in den ersten Wochen gering, steigt dann aber sprunghaft an – sofern sie gute Lebensbedingungen vorfinden. Doch das ist meist nicht der Fall: Denn die vergleichsweise wenigen geschlüpften Wasserflöhe sehen sich einem Heer aus Mückenlarven gegenüber, die ihnen Platz und Futter streitig machen. Das Konkurrenzprinzip funktioniert in beide Richtungen. Leider.

Irgendwann aber schlüpfen die Mückenlarven und verlassen das Wasser, während die Wasserflöhe endlich die Vorherrschaft im Tümpel übernehmen können. Dieses Gewässer ist nun vor erneuter Eiablage durch die Blutsauger geschützt. Auch wenn Wasserflöhe die Stechmücken langfristig aus ihrem Lebensraum vertreiben, so sind sie doch machtlos gegen deren kurzfristige, dafür aber explosionsartige Ausbreitung kurz nach dem Entstehen eines Gewässers.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT; NACH: IRIS KRÖGER

Bti-Toxin tötet die Mückenlarven in einem Tümpel, doch sobald das Insektizid abgebaut ist, bevölkern sie ihn erneut (blaue Kurve; der Graph ist logarithmisch aufgetragen). Eingesetzte Wasserflöhe verdrängen die Larven nur langsam (grüne Kurve). Werden beide Bekämpfungsmethoden kombiniert, bleibt die Anzahl der Mücken durchgehend niedrig (rote Kurve). Ohne jeden Eingriff ändert sich die Larvenmenge kaum (schwarze Kurve).

Wasserflöhe der Gattung *Daphnia* (links) konkurrieren mit den Larven der Gemeinen Stechmücke (*Culex pipiens*, rechts) um Platz und Nahrung. Neue Gewässer besiedeln die Mücken explosionsartig schnell, langfristig sind jedoch die Wasserflöhe im Vorteil.

Mit der richtigen Verstärkung könnte es dem Wasserfloh gelingen, ein Gewässer von Anfang an frei von Mückenlarven zu halten. Der *Bacillus thuringiensis israelenis* (Bti) produziert ein Gift, das den Darm der Mückenlarven zerstört. Seit zwei Jahrzehnten wird der Stoff großtechnisch aus Bakterienkulturen gewonnen und weltweit als biologisches Insektizid zur Mückenbekämpfung eingesetzt. Die Mückenlarven nehmen diese Substanz mit dem Futter auf und sterben daran. Schon einige Stunden nachdem Bti-Toxin in die Tümpel ausgebracht wurde, sind sie tot.

Der Wirkmechanismus im Darm ist so komplex und spezifisch, dass im Gegensatz zu chemischen Insektiziden nur die Larven der Stechmücke und einiger weniger anderer Insekten betroffen sind. Wasserflöhe und andere Tiere werden durch das Bti-Toxin nicht geschädigt. Der Haken: Als biologische Substanz zersetzt sich der giftige Eiweißstoff innerhalb weniger Tage und ist dann unwirksam. Schon nach kurzer Zeit besiedeln die Mückenlarven die Gewässer erneut und müssen wieder mit Bti-Toxin bekämpft werden. Das ist aufwändig und teuer. Und je häufiger das Gift eingesetzt wird, desto rascher entwickeln die Insekten Resistenzen dagegen.

Auf der einen Seite haben wir also ein Insektizid, das schnell, aber nur für kurze Zeit wirkt; auf der anderen Seite den Wasserfloh, der sich nur langsam entwickelt, dafür über einen langen Zeitraum hinweg Mückenlarven verdrängt. Ob sich daraus eine kombinierte Strategie gegen Stechmückenplagen entwickeln lässt, testete ich in einem Freilandversuch, und zwar, indem ich drei verschiedene Methoden der Mückenbekämpfung verglich: den alleinigen Einsatz des Bti-Toxins sowie den der Wasserflöhe – und eine Kombination aus beidem (Diagramm links).

Das Ergebnis bestätigte meine Vermutung. Das Insektizid senkte die Anzahl der Mückenlarven während der ersten zwei Wochen, doch nach einem Monat waren wieder genauso viele vorhanden wie in einem unbehandelten Gewässer. Wurden nur Wasserflöhe eingesetzt, so vermehrten sie sich auf Grund der Konkurrenz durch die Mückenlarven nicht stark genug. Deren Zahl sank daher nur wenig.

Den erhofften Erfolg brachte schließlich die Kombination des Bakteriengifts mit Wasserflöhen. Die Mückenlarven starben sofort, so dass die Krebstiere genug Platz und Futter vorfanden, und sich kräftig vermehrten. Auch als nach zwei Wochen die Wirkung des Insektizids nachließ, sank die Zahl der Mückenlarven weiter. Es waren also bereits genug Kleinkrebse vorhanden, um eine Neubesiedlung des Teichs zu unterbinden. Eine einmalige Behandlung mit dem Giftstoff genügte – sofern er gemeinsam mit Wasserflöhen eingebracht wurde. Diese geben den Mückenlarven als natürliche Konkurrenten den Rest.

Auf dem Weg in die Praxis sind indes noch einige Fragen zu klären. In welchen Arten von Gewässern, von der Pfütze bis zum Teich, wird eine solche Methode effektiv sein? Eignen sich statt lebender Krebse auch ihre Dauereier, um Lagerung, Transport und Anwendung in entlegeneren Regionen zu vereinfachen? Schließlich geht es nicht nur darum, den Plagegeistern hier zu Lande das Leben schwerer zu machen. Weltweit könnten die unscheinbaren Wasserflöhe zu Verbündeten werden – gegen einen der am meisten gefürchteten Überträger tödlicher Krankheiten.

ANDRÉ KÜNZELMANN, UFZ [M]

Iris Kröger

iris.kroeger@ufz.de

> geb. 1979 in München

> studierte Biologie in München

> promovierte am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) in Leipzig

> mit dem Thema »Biotopbindung, Nahrungsnetz und Kontrolle von heimischen Stechmückenlarven«

> Meine Stationen:

1. Im heimischen Garten führte ich als Kind erste »Verhaltensstudien« an Ameisen durch.

2. Im Zoo in München beobachtete ich für eine Schularbeit drei Monate lang Erdmännchen – und wollte danach unbedingt Biologie studieren.

3. Eine Tauchausbildung begeisterte mich für den Lebensraum Wasser – so kam ich zu den Mücken!

> Wenn ich nicht gerade forsche ...

... betreiben meine beiden kleinen Kinder Forschung an mir: Wie lange kommt Mama ohne Schlaf aus? Wann hebt sie meinen Löffel nicht wieder vom Boden auf?

> In fünf Jahren ...

... habe ich mich in der Mückenforschung etabliert, führe eine eigene Arbeitsgruppe und entschlüssle das geheime Leben der Stechmücke.

Wo kommt der Regen her?

Klimaforscher kennen die Wege, auf denen sich die Feuchtigkeit durch die Atmosphäre bewegt. Können sie damit auch vorhersagen, wie sich hier zu Lande die Regenmenge ändert, wenn anderswo weniger Wasserdampf aufsteigt? Computersimulationen machen klar: Der Zusammenhang von Niederschlag und Verdunstung ist komplizierter als bislang angenommen.

»Wo kommt der viele Regen eigentlich her?« – »Aus den Wolken, das siehst du doch!« – »Ja, aber wie kommt er da rein?« – »Aus dem Meer. Und aus den Bäumen.« Worüber sich in diesem Auszug aus dem Kinderhörspiel »Das Wunder Regenwald entdecken« drei tierische Bewohner des südamerikanischen Regenwalds unterhalten, das habe ich zum Gegenstand meiner Dissertation gemacht und den globalen Wasserkreislauf unter die Lupe genommen.

Der Mensch greift schon seit einigen Jahrtausenden in das Klimageschehen der Erde ein – indem er etwa Wälder rodet, um Ackerbau zu treiben. Die Landnutzung beeinflusst die hydrologischen Eigenschaften der Böden, also jene, die den Wasserhaushalt betreffen. So geben Bäume mit ihren tiefen Wurzeln einen größeren Anteil des versickerten Niederschlags in die Atmosphäre zurück als Acker- oder Weidepflanzen. Werden landwirtschaftliche Flächen hingegen künstlich bewässert, kann von diesen sogar mehr Wasser in die Atmosphäre aufsteigen, als dies im ursprünglichen Zustand der Fall war. Eine stärkere Verdunstung führt wiederum zu zweierlei: Mit ihr geht erstens eine Abkühlung einher – wie wir sie am eigenen Leib beim Schwitzen erfahren. Zweitens erhöht sie den Wasservorrat in der Atmosphäre, der schließlich irgendwo als Niederschlag wieder herunterkommen muss.

Mich interessiert insbesondere der zuletzt geschilderte Zusammenhang, den man als Feuchterecycling bezeichnet. Die wichtigsten Fragen dabei: Wo regnet das an einer Stelle verdunstete Wasser wieder herunter? Und, wie verändert sich die globale Verteilung der Niederschläge, wenn sich die Verdunstungsraten an einem bestimmten Ort ändern? Mich erstaunte, dass sich die beteiligten Klimaforscher bisher offenbar damit begnügten, die Antwort auf die erste Frage zu kennen. Wüssten sie nämlich genau genug über die Transportwege der atmosphärischen Feuchte Bescheid, so könnten sie sogar näherungsweise vorhersagen, wo und wie stark sich Verdunstungsänderungen auswirkten. Stammte zum Beispiel im normalen Zustand in einer Region B die Hälfte des Niederschlags aus einer Region A, hätte ein vollständiges Erliegen der Verdunstung dort zur Folge, dass es in Region B nur noch etwa halb so viel regnete.

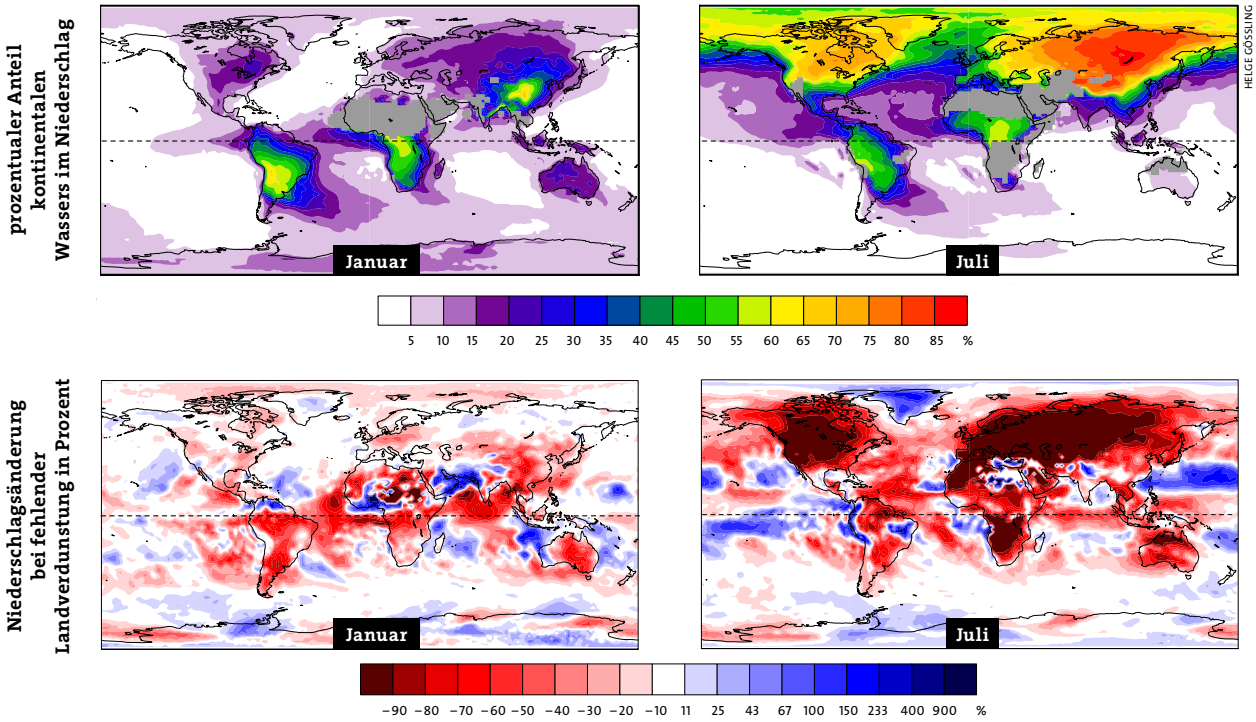
Die veränderten Verdunstungsraten haben jedoch noch andere Konsequenzen. Wasser verhält sich in der Atmosphäre eben nicht wie ein passives Schwebeteilchen. Die Phasenübergänge des Wassers sind vielmehr mit der Aufnahme beziehungsweise Abgabe von Wärme verbunden. Zudem ist Wasserdampf ein Treibhausgas, absorbiert also die von unserem Planeten abgegebene Wärmeenergie, die sonst in den Weltraum entweichen würde, und strahlt sie teilweise zur Erde zurück. Andererseits reflektieren die Wassertröpfchen in den Wolken einen Teil des auf die Erde fallenden Sonnenlichts zurück ins Weltall.

Die Wärmeverteilung wiederum beeinflusst sowohl die lokale Bildung von Niederschlag als auch die globalen Strömungsmuster. Kurzum, eine veränderte Verdunstung in einer Region bringt nicht einfach nur entsprechend mehr oder weniger Wasser in die Atmosphäre, sondern wirkt sich vielfältig aus. Mir geht es daher nicht bloß darum, herauszufinden, wo der Regen herkommt. Ich erforsche, was wir darüber hinaus wissen müssen, um das Zusammenspiel zwischen Verdunstung und Niederschlag zu verstehen.

Helge Gößling

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MIKE BECKERS

Die Superrechner des Deutschen Klimarechenzentrums in Hamburg gehören zu den weltweit leistungsfähigsten Computern, mit denen mögliche zukünftige Klimaänderungen simuliert werden. Helge Gößling führte seine Experimente mit dem hier abgebildeten Hochleistungsrechner »Blizzard« durch.



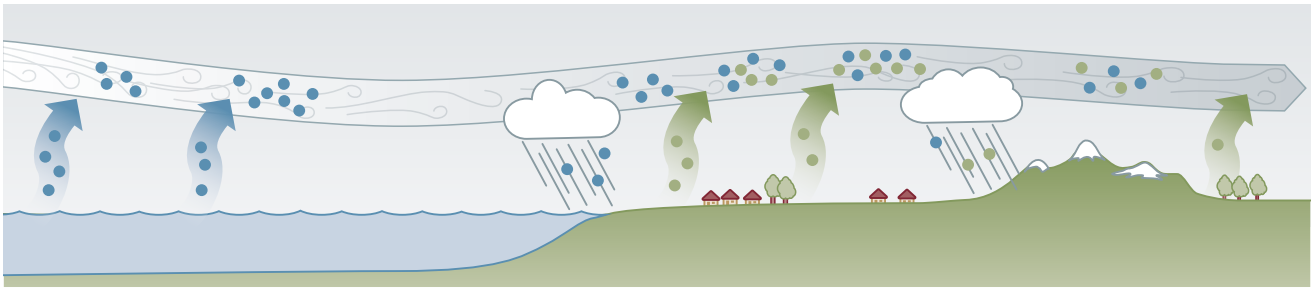
Doch ist bereits die Frage, wo Luftmassen das Wasser einer Regenwolke ursprünglich aufnahmen, nicht einfach zu beantworten. Messungen der chemischen Beschaffenheit des Niederschlags helfen da nicht, denn jedes Wassermolekül gleicht (abgesehen von isotopischen Varianten) dem anderen und lässt daher nicht auf seine Herkunft schließen.

Einzig Computermodelle machen das möglich. Sie dienen vornehmlich der Simulation von kurzfristigen Wetter- und langfristigen Klimaentwicklungen. Darin bewegen sich virtuelle Luftmassen über ein Abbild der Erdoberfläche. Trotz aller Vereinfachungen sind dafür leistungsfähige Supercomputer vonnöten – etwa die des Deutschen Klimarechenzentrums in Hamburg. Ich nutzte das Erdsystemmodell des dortigen Max-Planck-Instituts für Meteorologie und markierte die virtuellen Wasserteilchen, die in den verschiedenen Bereichen der Erde verdunsteten, unterschiedlich. Sie breiteten sich in der simulierten Atmosphäre aus und gingen schließlich irgendwo als Regen nieder. Dann las ich einfach anhand der Markierungen ab, aus welchen Gebieten die enthaltenen Wassermoleküle kamen und welchen Anteil sie jeweils am Niederschlag in einer bestimmten Region hatten (siehe Grafik unten).

Je nach Ort der Verdunstung wird Wasser unterschiedlich markiert und mit Luftströmungen durch die simulierte Atmosphäre transportiert. An der Zusammensetzung des Regens lässt sich ablesen, woher die Feuchtigkeit stammt.

So konnte ich die Erdoberfläche in verschiedene Quellregionen aufteilen. Hier möchte ich mich auf den besonders anschaulichen Fall beschränken, in dem Wasser lediglich danach unterschieden wird, ob es aus dem Ozean oder von den Kontinenten stammt. Können wir bereits aus dieser einfachen Unterscheidung etwas über das komplexe Zusammenspiel von Verdunstung und Niederschlag lernen?

Je nachdem, wo das Wasser niedergeht, stammen meiner Simulation zufolge bis zu 85 Prozent davon aus Landverdunstung (siehe oberste Karten). Derartig hohe Anteile werden allerdings nur im Nordsommer im östlichen Teil Eurasiens erreicht. Hier wehen die Luftmassen üblicherweise von Westen heran und haben viel Zeit, in Europa und Westasien mit kontinentalem Wasser betankt zu werden.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK, NACH: HELGE GÖSSLING

Die Karten oben zeigen den simulierten Anteil des über den Kontinenten verdunsteten Wassers im weltweiten Niederschlag für die Monate Januar und Juli, gemittelt über zehn Jahre heutigen Klimas. In den grau gefärbten Regionen regnet es mehr als die Hälfte der Zeit gar nicht. Bei völlig fehlender Landverdunstung (unten) ändern sich die simulierten Niederschlagsmengen vielerorts drastisch, vor allem im Nordsommer. So klar definierte Simulationen sind ein wichtiger erster Schritt, um zu klären, wie sich veränderte Verdunstungsraten global auswirken.

Bislang wurde angenommen, das Wissen über die Transportwege reiche aus, um die Konsequenzen veränderter Verdunstungsraten zu berechnen. Dann könnten wir mit meinen Ergebnissen also vorhersagen, wo der Niederschlag wie stark abnähme, wenn sämtliche Landmassen ihre Fähigkeit, Wasser zu verdunsten, gänzlich verlören. Zwar ist ein solches Szenario völlig unrealistisch, doch handelt es sich um einen wohldefinierten Fall, mit dem sich die Gültigkeit dieser Annahme prüfen lässt. In der Realität müssten für unser Experiment alle Landoberflächen in steinige Wüsten verwandelt werden – mit einem Klimamodell lassen sich derartige Verhältnisse hingegen leicht simulieren.

Das Ergebnis: Ohne Landverdunstung käme es in weiten Teilen der Erde zu drastischen Minderungen der Niederschlagsmengen (siehe untere Karten links), vor allem im Nordsommer in Eurasien und Nordamerika. Dies stimmt tatsächlich mit dem überein, was wir auf Grund der Anteile kontinentaler Feuchte im Niederschlag erwarten sollten. Bei genauerem Hinsehen jedoch zeigt sich, dass die Muster nicht recht zusammenpassen. Warum nimmt der Niederschlag vielerorts zu, beispielsweise in Grönland im Juli, wenn dort laut meiner Simulation doch im Normalzustand zwischen 60 und 70 Prozent des Niederschlags aus Landverdunstung stammen? Und warum wird es im Juli im Westteil Eurasiens und Nordamerikas trockener als im Ostteil, da wir doch das Gegenteil erwarten?

Die Antwort habe ich oben bereits vorweggenommen. Wasserteilchen strömen nicht nur passiv von A nach B, sondern beeinflussen ihrerseits das Geschehen in der Atmosphäre entscheidend. So würde es infolge der ausbleibenden Verdunstungskühlung auf den Kontinenten deutlich wärmer, in Eurasien und Nordamerika im Juli um bis zu 16 Grad Celsius! Das wiederum hätte schwer wiegende Folgen für die atmosphärischen Windmuster. Unter anderem würden die vorherrschenden Westwinde derart abgeschwächt, dass Europa und das westliche Nordamerika unter stärkeren kontinentalen Einfluss gerieten. Dies erklärt, warum es dort bei fehlender Landverdunstung kaum noch regnete.

Meine Ergebnisse verdeutlichen, dass es eben nicht genügt zu wissen, wo der Regen herkommt, um die Auswirkungen veränderter Verdunstungsraten abzuschätzen. Wasser ist ein zentraler Mitspieler im atmosphärischen Geschehen. Nun gilt es herauszufinden, ob sein Einfluss ausreichend stark ist, um auch bei realistischeren Szenarien, also bei weniger drastischen Eingriffen in den Verdunstungshaushalt der Erde, die Atmosphäre derart aus dem Takt zu bringen. Oder ob in solchen Fällen womöglich tatsächlich die einfache, bisher übliche Analyse der Transportwege reicht.

Untersuchungen wie diese tragen zu einem ganzheitlicheren Verständnis des Klimasystems bei. Und vielleicht könnten wir in Zukunft sogar durch wohlüberlegte Landnutzung katastrophalen Ereignissen wie Dürren und Unwettern entgegenwirken.

MIKE BECKERS [M]

Helge Gößling

helge.goessling@awi.de

> geb. 1983 in Hamburg

> studierte Biophysik in Berlin

> promovierte im Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg

> mit dem Thema »Continental moisture recycling and evaporation-precipitation coupling: water as passive tracer and as active component«

> Meine Stationen:

1. Mit meinen drei Brüdern wurde ich naturnah im französischen Jura groß – wir halfen auf dem Bauernhof nebenan und sammelten Fossilien.

2. Zwischen Studium und Gesangsausbildung wählte ich die erste meiner beiden Leidenschaften zum Beruf. Das gelang sogar in der Regelstudienzeit – nach der Geburt meiner ersten Tochter eine besondere Herausforderung.

> Wenn ich nicht gerade forsche …

… bin ich vermutlich entweder bei meiner Familie oder singe mit meinem Vokalquintett SeiCento.

> In fünf Jahren …

… finde ich trotz Forschung – seit Oktober 2012 am Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in Bremerhaven – und Lehre noch genügend Zeit für die mittlerweile vier Frauen in meiner Familie und die Musik.

Auf winzigen Schaltkreisen lässt Ulrich Bohrn lebende Zellen wachsen. Ein Computer überwacht deren Reaktion auf Giftstoffe in einem Gasgemisch. Mehrere Chips arbeiten nebeneinander, um die Luftqualität kontinuierlich und zuverlässig zu kontrollieren.

THORSTEN NÄSER

Lebende Zellen »erschnüffeln« giftige Gase

Viele Schadstoffe in der Luft sind unsichtbar und geruchlos. Zwar gibt es empfindliche Messgeräte, doch die warnen nur vor bekannten Schadstoffen. Lebende Zellen hingegen reagieren auf alle Gifte – ließe sich mit ihnen der perfekte Universalsensor konstruieren?

Es ist dunkel, feucht und über 30 Grad Celsius heiß. Wir befinden uns auf einer Zeitreise und besuchen ein Bergwerk im frühen 20. Jahrhundert. Plötzlich ruft ein Kumpel »Alarm!« aus einem der tiefsten Stollen. Tödliches Gas! Fast panisch verlassen die Bergleute die Grube. Ihr Lebensretter: ein Kanarienvogel.

Diese und andere Vögel waren vor mehr als 100 Jahren die ersten Echtzeitwarnsysteme. Sie reagierten auf gefährliche Gase wie etwa Methan oder Kohlenmonoxid, die sich in den schlecht belüfteten Tiefen eines Bergwerks bilden – unsichtbar und für den Menschen geruchlos. Die kleinen Vögel haben einen im Vergleich zu uns viel schnelleren Stoffwechsel und spüren die Auswirkungen der Gase früher, was sie den Bergmännern durch ihren warnenden Gesang anzeigten – oder spätestens durch ihr Verstummen.

Kanarienvögel waren bis zum Ende der 1980er Jahre im Einsatz und wurden erst nach und nach durch moderne Gassensoren ersetzt. Diese reagieren noch empfindlicher

Auf diesem Siliziumchip wachsen menschliche Lungenzellen. Am rechteckigen Muster links entstehen Signale, wenn sich ihre Gestalt ändert. Weitere Elektroden liefern Daten zu pH-Wert (Mitte) und Sauerstoffgehalt (Kreis rechts) der Nährlösung. Die goldfarbenen Bahnen leiten die Signale zur Auswertungselektronik.

und zuverlässiger als die Vögel, haben aber auch Nachteile. So registrieren sie nur bekannte Gase. Solche, mit denen ihre Konstrukteure nicht gerechnet haben, erkennen sie nicht.

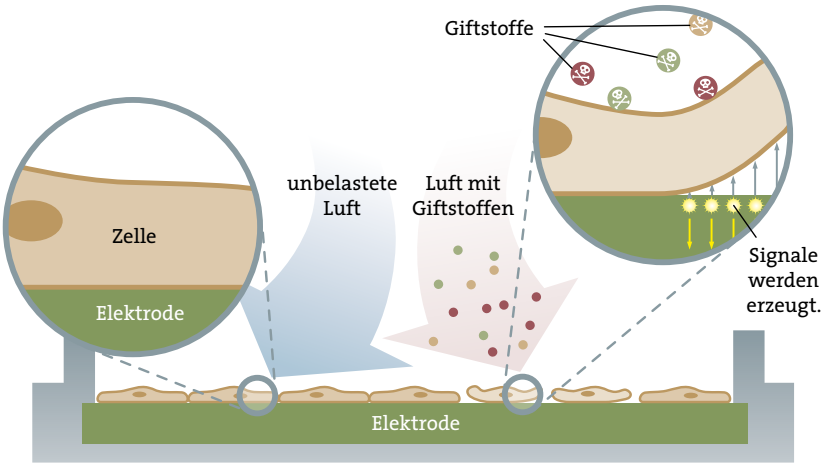
Verlässliche Warnsysteme braucht es freilich nicht nur in Bergwerken. Arbeiter in der chemischen Industrie sind ebenso gefährdet wie die ahnungslosen Opfer eines Giftgasanschlags – etwa im Jahr 1995, als Sektenmitglieder in der Tokioter U-Bahn ein geruchloses Nervengift verbreiteten, 13 Menschen töteten und Tausende verletzten.

Einzig lebende Organismen reagieren auf alle potenziell gefährlichen Stoffe. Das ist auch der Grund, warum noch immer Tierversuche nötig sind, um die Giftigkeit von Wirkstoffen oder Chemikalien zu prüfen. Doch sind solche Experimente aufwändig, teuer und ethisch umstritten. Mein Ziel war es, die Vorteile lebender Zellen und technischer Sensoren zu kombinieren – ohne die jeweiligen Nachteile. In meiner Doktorarbeit entwickelte ich einen Hybriden: einen elektronischen Chip, der mit Hilfe eines Sensors aus biologischem Gewebe Schadstoffe in der Luft aufzuspüren vermag.

Zellbiologen analysieren seit vielen Jahrzehnten, wie sich Verunreinigungen in der Luft auf lebende Gewebe auswirken. Solche Zellen stammen von Säugetieren und werden einmalig entnommen. Mit Hilfe biochemischer Verfahren werden sie zur Teilung angeregt, so dass ständiger Nachschub gesichert ist. Der ist auch nötig, denn die aufwändigen Testverfahren haben meist den Zelltod zur Folge. Man probiert also aus, von welchen Stoffen eine Gefahr ausgeht, und baut dann elektronische Sensoren, mit denen sich die Konzentrationen genau dieser Gifte kontinuierlich messen lassen.

Mein Ziel war nun, die Zellen eben nicht durch ein bestimmtes Gas abzutöten, sondern ihren Zustand zu überwachen. Vor allem würde es auf diese Weise möglich, allgemeine Verschlechterungen der Luftqualität festzustellen – ganz gleich, welcher Stoff sie auslöst.

Die Oberfläche des Chips ist komplett von einer Gewebeschicht bedeckt (Situation links). Kommen die Zellen mit Giftstoffen in Kontakt, ändern sie unter anderem ihre Form (rechts). Diese Reaktion wird mit Hilfe von Elektroden gemessen.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK, NACH: ULRICH BOHRN

Dazu ließ ich lebende Zellen auf einem Sensorchip anwachsen, mit dem sich verschiedene Veränderungen in der Zelle elektronisch messen lassen.

Eine Impedanzelektrode reagiert, wenn die Zellen ihre Form ändern. Unter dem Einfluss von Stress versuchen sie, ihre Oberfläche zu minimieren: Sie nehmen eine kugelige Gestalt an und lösen sich teilweise von ihrem Untergrund (siehe Bild links unten). Die Elektrode registriert bereits ein leichtes Abheben der Zelle von der Chipoberfläche.

Mit Hilfe einer Sauerstoffelektrode lässt sich die Konzentration von Sauerstoff im flüssigen Nährmedium bestimmen. Um ihren Energiebedarf zu decken, nehmen die Zellen neben den Nährstoffen auch gelösten Sauerstoff aus dem Medium auf. Bei höherer Atmungsaktivität sinkt der Sauerstoffgehalt also schneller. Sind die Zellen indes geschwächt, verringert sich die Sauerstoffatmung.

Die pH-Elektroden zeigen schließlich den Säuregrad im Medium an. Wenn die Zellen Nährstoffe wie etwa Zucker zur Energiegewinnung verarbeiten, entstehen Verbindungen wie Milchsäure und Kohlendioxid. Diese Stoffe machen die Nährlösung, deren pH-Wert dadurch sinkt, saurer – bei höherer Stoffwechselaktivität geht das entsprechend schneller.

Kommen die Zellen mit giftigen Substanzen in Kontakt, registrieren die drei Elektroden die Reaktion des Gewebes. Die Zelle verformt sich, die Atmung wird beeinträchtigt, und der Stoffwechsel passt sich den neuen Bedingungen an. Das Zusammenspiel dieser Veränderungen zeigt nicht nur das Vorhandensein einer giftigen Substanz an, sondern auch den Schweregrad der Vergiftung. Bei milden Vergiftungserscheinungen erholen sich die Zellen nach einiger Zeit wieder. Höhere Schadstoffkonzentrationen können zu nachhaltigen Veränderungen bis zum Tod der Zellen führen, wodurch der Chip seine reaktive Schicht und damit seine Funktionsfähigkeit verliert. Die Zellen werden in dem Fall einfach ersetzt, so dass der Sensor innerhalb von 24 Stunden wieder einsetzbar ist.

Allerdings lassen sich mit dem Zellchip keine einzelnen Gifte identifizieren oder deren Konzentration bestimmen. Dafür ermöglicht er, unspezifisch gefährliche Gasgemische zu erkennen, die für uns Menschen schädlich sein könnten.

Bei der Konstruktion des Chips war die größte Herausforderung, dass die Zellen einerseits vom Nährmedium umspült werden müssen. Andererseits ist schon eine dünne Flüssigkeitsschicht eine große Barriere für wenig wasserlösliche Gase wie Kohlenmonoxid. Der Ausweg: Das Medium wird kurzzeitig abgesaugt, so dass die Luft direkt an die Zellmembranen gelangt. Mehrere Einzelchips arbeiten zeitversetzt, um die Luft während dieses Vorgangs kontinuierlich zu überwachen.

Bevor unser Zellchip eines Tages in der Praxis einsetzbar ist, stehen viele weitere Tests bevor. So müssen wir klären, welche Zellarten sich für die verschiedenen Anforderungen am besten eignen. Bisher verwenden wir unter anderem menschliche Lungenzellen, doch liegt es nahe, dass beispielsweise Nervenzellen auf bestimmte Stoffe ganz anders reagieren. Und wir müssen herausfinden, ob der Detektor auf eine Vielzahl von bereits bekannten Giften zuverlässig reagiert. Erst dann können wir davon ausgehen, dass er universell einsetzbar ist und insbesondere auch unbekannte oder unerwartete Schadstoffe erkennt. Dann wäre der Zellchip ein echter Universaldetektor – so wie der Kanarienvogel der Bergleute.

Ulrich Bohrn
ulrichbohrn@hotmail.com

THORSTEN NAESER [M]

> geb. 1986 in der Wiener Neustadt

> studierte Chemie in Wien

> promovierte kooperativ an der belgischen Universität Hasselt, der FH Aachen und bei Siemens CT

> mit dem Thema »Multiparametric cell-based sensor system for the detection of toxic pollutants in air«

> Meine Stationen:

Eine Bronzemedaille bei der Chemieolympiade in Österreich motivierte mich als Schüler; ein Gammelfleischsensor im »Labor 8« des Instituts für Biochemie an der Universität Wien wurde während meiner Diplomarbeit zur Herausforderung. Das führte mich schließlich zur »Chemical Sensors Group« bei Siemens Corporate Technology in München.

> Wenn ich nicht gerade forsche ...

... befasse ich mich mit Juristerei und engagiere mich in Vereinen wie dem Jungchemikerforum München.

> In fünf Jahren ...

... werde ich weiterhin im Dienst der Wissenschaft stehen – aber nicht mehr im Labor, sondern als Patentanwalt bei Lanxess in Köln.

Katja Heubach

Wo das Geld auf den Bäumen wächst

Katja Heubach betrachtet eine Sheanuss, in der anderen Hand hält sie eine Frucht des imposanten Baobabs. Diese und zahllose weitere Produkte der Savanne haben einen großen wirtschaftlichen Nutzen, insbesondere für die Ärmsten in der Bevölkerung.

In vielen Regionen Afrikas scheint für die arme Bevölkerung Ackerland zunächst wichtiger als unberührte Savanne. Doch Artenschutz kann sich lohnen! Der ökonomische Wert der Pflanzenvielfalt ist erstaunlich hoch.

Mit einer großen bunten Schüssel auf dem Kopf streift die junge Frau durch das Unterholz. Ihr Gesicht verschwindet fast völlig im Schatten des blechernen Ungetüms. Es ist späte Trockenzeit in der westafrikanischen Savanne Benins. Der Blick der hochgewachsenen Frau wandert konzentriert durch die Landschaft auf der Suche nach deren größtem Schatz: den reiche Früchte tragenden Bäumen.

Die Bewohner der Savanne sammeln nicht nur zur eigenen Versorgung Nahrung und Rohstoffe. Auf Märkten verkaufen sie die Überschüsse. Es sind vor allem die Frauen, die sich auf diese Weise ein Einkommen sichern. Doch landwirtschaftliche Nutzung und Klimawandel bedrohen die Artenvielfalt und somit diese traditionelle Lebensweise. Artenschutz spielt bei den Regierungen der Region kaum eine Rolle, wenn es darum geht, eine wachsende und größtenteils in Armut lebende Bevölkerung zu ernähren.

Ließe sich der volkswirtschaftliche Wert der Biodiversität jedoch beziffern, lägen klare ökonomische Argumente zu ihrer Erhaltung vor. Doch bisher gab es vor allem für die semiariden Klimazonen in Westafrika allenfalls spärliche Daten, die über Vielfalt, Mengen und Nutzung der verschiedenen Pflanzenprodukte Auskunft geben.

Eine der wichtigsten Nutzpflanzen dieser Region ist zugleich ihr imposantes Wahrzeichen: der Affenbrotbaum oder Baobab *(Adansonia digitata)*. Seine bis zu 35 Meter hohe Krone ragt aus einem kurzen, dicken Stamm. Seine goldgelben Früchte sind so groß wie Kokosnüsse und enthalten ein Vitamin-C-reiches Puder. Die erbsengroßen, proteinreichen Samen werden in die Suppe gerieben. Noch begehrter sind die saftig-grünen Blätter des Baobabs. Nach langem Köcheln ergeben sie eine ziemlich zähflüssige, giftgrüne Soße, die dem Beniner eine Leibspeise zu Yams- oder Maisbrei ist. Wegen ihrer Konsistenz wird sie im Volksmund als »klebrige Soße aus dem Busch« bezeichnet. Mit geübten Handgriffen schlägt unsere Savannenläuferin Früchte und Blätter vom Baum und lässt sie in der Schüssel auf ihrem Kopf verschwinden.

Nur ein paar Schritte weiter ragt ein Sheabutter-Baum *(Vitellaria paradoxa)* in die Höhe und lockt mit seinen süßen Früchten. Sie sind nicht nur Pausensnack und Flüssigkeitsspender während des Sammelns. Die Frau hat es vielmehr auf die walnussgroßen Samen abgesehen, die vor gehaltvollem Öl nur so strotzen. Eine Sheanuss enthält zwischen 20 und 50 Prozent davon. Das macht sie nicht nur zum wichtigsten regionalen Speiseöllieferanten, sondern auch zum wichtigsten Grundstoff für Hautpflegemittel – auch außerhalb Westafrikas. Das reichhaltige Sheaöl findet sich weltweit in zahlreichen Kosmetikprodukten.

Die Sheafrüchte sind über Nacht zu Boden gefallen. Mit flinken Bewegungen wandern auch sie in die mittlerweile gut gefüllte Schüssel der Beninerin. Langsam sinkt die Sonne auf die Savanne herab. Es ist Zeit, nach Hause aufzubrechen und das Abendbrot zu richten.

Würden wir unsere Sammlerin weiter bei ihren täglichen Streifzügen durch die Savanne begleiten, stießen wir auf eine Fülle weiterer Nutzpflanzen. In Nordbenin untersuchte ich diese Vielfalt während meiner Doktorarbeit, ermittelte die verschiedenen Verwendungen für die Pflanzenteile durch die Bevölkerung und versuchte, den ökonomischen Wert des Pflanzenreichtums zu beziffern.

Die Einheimischen nutzen mehr als 90 Gehölzarten aus dem »Supermarkt Savanne« für ganz unterschiedliche Zwecke. Die Blätter, Samen, Wurzeln, Früchte, das Holz und die Rinden der Bäume sind schmackhaft, finden Anwendung in der traditionellen Medizin, dienen der Energieversorgung oder werden zum Bau von Möbeln und Hütten genutzt oder von den vielen Kunsthandwerkern der Region.

Durch die Verarbeitung und den Verkauf der gesammelten Pflanzenteile schaffen sich die Frauen ein wichtiges Ein-

RUDI FELSER

KATJA HEUBACH

Geübt balancieren Sammlerinnen in Nordbenin Blechschüsseln auf ihrem Kopf (oben). Früchte, die sie nicht selbst verbrauchen, verkaufen sie auf Märkten. Sheanüsse werden etwa zu Butterkugeln verarbeitet (links). So sichern sich insbesondere Frauen ein wichtiges eigenes Einkommen.

kommen, ohne das sie wesentlich abhängiger von den Einkünften ihrer Männer wären.

Es ist somit offensichtlich, dass die Haushalte von den vielen Wildpflanzenarten profitieren. Meine Kollegen und ich wollten jedoch den ökonomischen Wert von Shea, Baobab und Co. genau beziffern. Durch detaillierte Befragungen ermittelten wir für insgesamt 230 Haushalte, welche Pflanzen im Lauf eines Jahres gesammelt wurden und in welchen Mengen sie die Einwohner verbrauchten und verkauften.

Bei vielen Produkten legten wir die Verkaufspreise auf regionalen Märkten zu Grunde. Bei anderen Waren, die nicht gehandelt werden, ermittelten wir ebenfalls realistische Werte. Dazu verglichen wir die Produkte mit anderen Erzeugnissen, die eine ähnliche Funktion erfüllten, oder wir ließen die Einheimischen selbst den Preis eines Produkts schätzen, indem sie es mit anderen Gütern verglichen und so eine Rangliste erstellten.

Wir berechneten den jährlichen Beitrag einer Sammlerin zur Versorgung und zum Einkommen einer Familie und kamen zu einem erstaunlichen Ergebnis: Rund 39 Prozent des Jahreseinkommens einer Familie stammen aus Wildpflanzen! Bei etwa 700 Euro, die einem Beniner im Jahr zur Verfügung stehen, sind das gut 270 Euro. Die Wildpflanzenprodukte sind somit die zweitwichtigste Einkommensquelle nach den Erlösen aus der Landwirtschaft. Da sich im ländlichen Raum kaum Einkommensalternativen bieten, werden die Wildpflanzen insbesondere von den ärmsten Bevölkerungsschichten gesammelt. Sie sind folglich von der pflanzlichen Vielfalt der Savanne besonders abhängig.

Und die ist zunehmend gefährdet: Immer mehr Baumarten verschwinden aus der Landschaft. Dies ist einerseits Folge des globalen Klimawandels, denn seit den 1970er Jahren kommt es in der Region immer häufiger zu Dürren. Andererseits verändert sich die Landnutzung in Westafrika. Um die wachsende Bevölkerung zu ernähren, müssen landwirtschaftliche Flächen gewonnen werden – und die entstehen durch die Umwandlung von Savannengebieten. Auch verkürzen die Bauern die Brachezeiten der bestehenden Äcker – mit negativen Folgen für die Fruchtbarkeit der Böden und die Ernteerträge.

Hinzu kommt, dass die beninische Regierung – wie die anderer westafrikanischer Länder auch – seit einigen Jahren den Anbau von Baumwolle forciert. Sie verspricht hohe Renditen auf dem Weltmarkt. Die großflächige Anpflanzung dieser so genannten Cash Crops geht zu Lasten der Nahrungsmittelproduktion und verschlimmert die Situation zusätzlich. So fallen immer mehr Gehölze entweder den Macheten, dem Feuer oder den neu eingeführten Landmaschinen zum Opfer. Versorgungsengpässe, insbesondere bei den ganz Armen, sind die Folge.

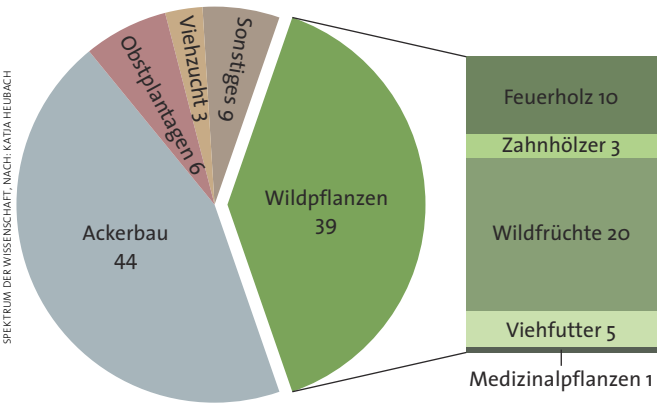
Wir hoffen, dass wir mit unseren Untersuchungen dazu beitragen, dass jene Regierungen bei ihren Entscheidungen die Bedeutung der ökologischen Vielfalt erkennen, und zwar auch als wirtschaftlichen Faktor! Doch bis das so weit ist, liegt der Schutz der Savanne vor allem in den Händen lokaler Nichtregierungsorganisationen. Ein Beispiel: Gemeinsam mit dem Netzwerk REDERC (Réseau de Développement de Réserves naturelles Communautaires) legen wir derzeit einen Nutzwald an und wählen die Arten auf Grundlage

unserer wissenschaftlichen Untersuchungen in der Gemeinde. Vor zehn Jahren gründete ein Einheimischer diese Organisation in dem kleinen Dorf Papatia. Sie zählt mittlerweile mehr als 300 Mitglieder in vier Gemeinden. In ihrer Obhut liegen zehn mehrere Hektar umfassende Schutzzonen und zehn Schulgärten. Der erste Garten wurde 2001 auf Initiative der traditionellen Heiler im Ort eingerichtet, die den massiven Rückgang zahlreicher wichtiger Medizinalpflanzen feststellten. Heute sichert der Garten deren Vorkommen und ermöglicht den Heilern, ihr Wissen anzuwenden und weiterzugeben. Die Herstellung von Honig sichert insbesondere den ärmsten Gemeindemitgliedern ein Einkommen. Mittlerweile gibt es mehr als 60 Wildbienenstöcke, die jeweils bis zu 25 Liter Honig in einer Saison erzeugen.

Initiativen wie diese zeigen, dass die Bewohner der Savanne auf vielfältige Weise von Wildpflanzen profitieren. Wir konnten solchen Prozessen einen klaren ökonomischen Nutzen zuschreiben. Das hilft nicht nur bei der Gestaltung regionaler Projekte wie in Papatia. Der nächste Schritt wird sein, diese Zusammenhänge zur Grundlage überregionaler Landnutzungspläne zu machen.

Unsere Arbeit zeigt aber auch die Kehrseite einer anderen Strategie – und zwar die, die Artenvielfalt durch die Einrichtung von Schutzzonen zu bewahren: Wird den Einheimischen nämlich die Nutzung der Pflanzen verwehrt, kann sich ihre wirtschaftliche Lage verschlechtern. Hingegen könnte eine Aufforstung mit den ökonomisch wichtigsten wilden Arten den Ertrag der Sammler steigern und Einkommensalternativen schaffen. Viele bereits degradierte und nicht mehr für den Anbau von Feldfrüchten geeignete Flächen könnten so einer neuen Nutzung zugeführt werden – das hilft der Bevölkerung und der Natur gleichermaßen.

Anteil am Einkommen in Prozent



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: KATJA HEUBACH

Ein durchschnittlicher Haushalt in Nordbenin erwirtschaftet etwa 39 Prozent seines Einkommens aus dem Verkauf von Wildpflanzen. Müsste die arme Bevölkerung auf diese wichtige Einkommensquelle verzichten, verschlechterte sich ihre wirtschaftliche Situation dramatisch.

Und unsere Savannenläuferin? Ihr ist zu wünschen, dass sie auch weiterhin die reichen Schätze ihrer heimischen Natur in Fülle ernten kann, um sich und ihre Familie zu versorgen. Und die Forschung kann dabei helfen, indem sie zeigt: Biodiversität ist Mehrwert!

Katja Heubach
katja.heubach@senckenberg.de

RUDI FEUSER [M]

› geb. 1981 in Apolda

› studierte Biologie in Frankfurt a. M.

› promovierte am Biodiversität und Klima Forschungszentrum (BiK-F) in Frankfurt a. M.

› mit dem Thema »The socio-economic importance of NTFPs for rural livelihoods in West African savanna ecosystems: current status and trends«

› Meine Stationen:

1. Die täglichen Streifzüge nach Kienäpfeln, Heidelbeeren, Pilzen und Co., die ich als Kind mit meiner Großmutter im schönen Wald meiner Heimat Thüringen gemacht habe.

2. Mein erstes Umweltcamp mit der Naturfreundejugend Bayern im Alter von 15 Jahren.

3. Mein Praktikum bei der Schutzstation Wattenmeer auf Eiderstedt.

4. Meine erste Forschungsreise nach Ouagadougou.

› Wenn ich nicht gerade forsche …

… kümmere ich mich gemeinsam mit meinen BUND-Kolleginnen und -Kollegen als »Urban Gardener« um die Frankfurter Stadtnatur – für mehr Biodiversität und Lebensqualität in der Großstadt.

› In fünf Jahren …

… werden wir in Nordbenin einen Nutzgarten und in Frankfurt einen Stadtgarten ähnlich den Prinzessinnengärten in Berlin auf die Beine gestellt haben.

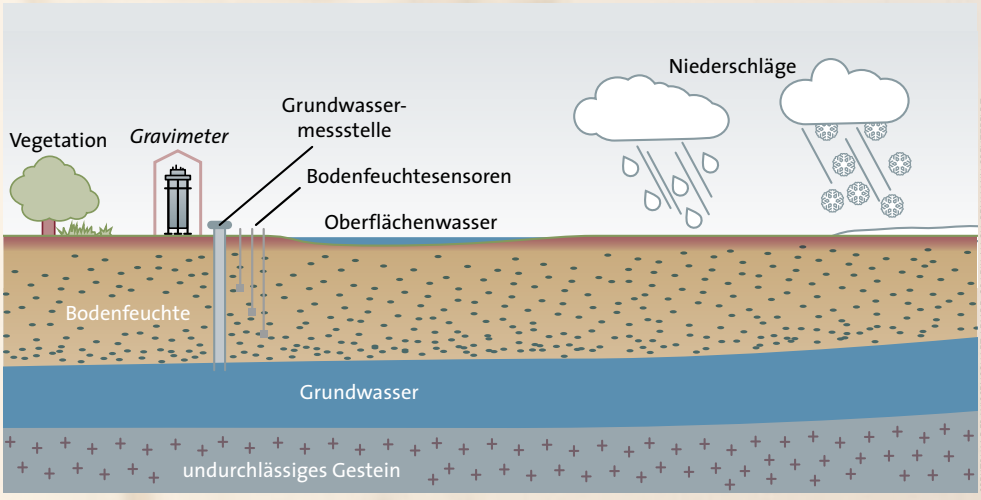
Wasser – ein anziehendes Element

Wenn es regnet, wird der Boden nass – das weiß jedes Kind. Doch wo bleibt das Wasser? Wie viel versickert? Und wohin? Um Antworten auf diese Fragen zu finden, müssen Forscher zahlreiche Bodensensoren installieren und teure Grundwassermessstellen bohren. Moderne Schwerkraftmesser versprechen Abhilfe.

Unter unseren Füßen lagert eine lebenswichtige Ressource: Grundwasser. Etwa die Hälfte unseres Bedarfs decken wir daraus, in einigen ländlichen Regionen sogar bis zu 90 Prozent. Die unterirdischen Speicher erscheinen unerschöpflich, und tatsächlich erneuern sie sich ständig. Doch tun sie es schnell genug, um den wachsenden Verbrauch zu decken?

Das Wasser ist ständig in Bewegung – in, auf und über der Erde. All das ist qualitativ gut erforscht. Quantitative Aussagen sind indes äußerst schwierig, insbesondere für die Reservoire im Untergrund, die für uns so wichtig sind. Zum einen ist das Bohren von Brunnen teuer. Zum anderen kann man aus den Grundwasserpegeln nicht ohne Weiteres auf die gespeicherte Menge schließen.

Bei der Suche nach neuen Methoden für die Überwachung von Grundwasserressourcen half meinen Kollegen vom Deutschen GeoForschungsZentrum Potsdam und mir eine Anfrage aus dem Bayerischen Wald. Dort, am Geodätischen Observatorium Wettzell, überwachen Forscher des Bundesamts für Kartografie und Geodäsie seit Jahren mit einem hochpräzisen Gravimeter die Anziehungskraft der Erde. Einen Teil ihrer Daten konnten sie sich nicht erklären. Sie gingen bereits von einem Zusammenhang mit schwankenden Grundwasserspiegeln aus, doch die Korrekturen,



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK; NACH: BENJAMIN CREUTZFELDT

Das Wasser in der Natur ist ständig in Bewegung – etwa im feuchten Boden oder als Grundwasser. Die jeweiligen Mengenänderungen lassen sich mit verschiedenen Sensoren sowie Grundwassermessstellen erfassen. Forscher können sie aber auch mit Hilfe eines Gravimeters, das auf entsprechende Massenänderungen reagiert, abschätzen.

Vor über 100 Jahren nutzten Wissenschaftler in Potsdam das Pendel im Hintergrund, um die Erdanziehung zu messen. Der ermittelte Wert war bis zum Jahr 1971 internationale Referenz. Forscher wie Benjamin Creutzfeldt messen heute mit modernen Geräten 1000-fach genauer.

KAROLINE WOLF; BILDHAUS

die sie vornahmen, stellten die Wissenschaftler noch nicht zufrieden. So war das Thema meiner Doktorarbeit geboren.

Das Schwerkraftfeld der Erde entsteht zum einen durch die Anziehung ihrer Massen – ein Effekt, den Isaac Newton bereits 1687 beschrieben hat. Das sind vor allem die tausende Kilometer Gestein unter uns. Zum anderen erzeugt die Rotation unseres Planeten eine Fliehkraft. Im Vergleich dazu wirkt sich Wasser wenig auf die Erdanziehung aus. Doch gerade für die relativ kleinen Beiträge durch die Massen auf und dicht unter der Erdoberfläche interessieren sich die Geodäten besonders.

Wäre unser Planet eine homogene Kugel, dann wöge derselbe Körper allerorts gleich viel. Doch wegen seiner Drehbewegung und der dadurch entstehenden Fliehkraft ist die Erde abgeplattet und hat am Äquator einen etwa 40 Kilometer größeren Durchmesser als an den Polen. Als Modell sowohl für die Gestalt der Oberfläche als auch die des Schwerefelds wird deshalb ein Rotationsellipsoid verwendet. Wie jedes Modell beschreibt dieses die Natur nur näherungsweise. So wälzen etwa im oberen Erdmantel gewaltige Konvektionsströme die Gesteinsmassen um. Aber selbst Gebirge und Täler beeinflussen die Schwerkraft regional.

Als wären diese Einflüsse nicht kompliziert genug, ändert sich die Erdschwerkraft darüber hinaus an ein und demselben Ort im Lauf der Zeit. Jeder kennt das Auf und Ab der Meere bei Flut und Ebbe. Nur wenigen ist jedoch bewusst, dass die Kräfte von Sonne und Mond auch die gesamte Erde deformieren. Berlin zum Beispiel hebt und senkt sich täglich um bis zu 40 Zentimeter! Solche Prozesse müssen beispielsweise bei der GPS-Navigation und in der Raumfahrt berücksichtigt werden.

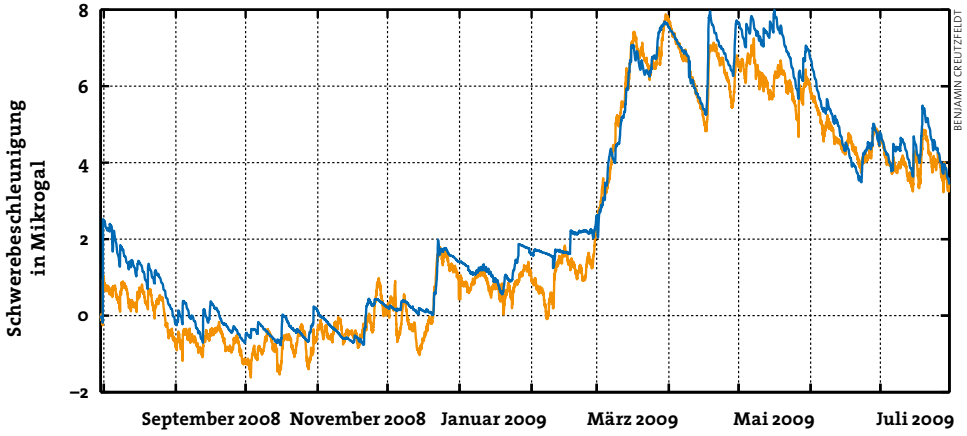
Um das Schwerkraftfeld unseres Planeten modellieren zu können, messen Geodäten und Geophysiker die Erdanziehung an möglichst vielen Punkten direkt – auf der Erde selbst, vom Flugzeug aus oder aus dem All mit Hilfe von Satelliten. Auf der Erde bestimmen sie mit Gravimetern die Kräfte, die auf eine Testmasse wirken. Die ersten Untersuchungen wurden bereits zu Newtons Zeiten mit einfachen Pendeln gemacht, später kamen Messungen mit Federwaagen und Versuche mit dem freien Fall hinzu. Mit

Die Forscher stanzten einen tonnenschweren Block aus dem Erdreich, um darin die Bewegungen des Sickerwassers zu studieren.

den genauesten Gravimetern ist man heute in der Lage, Unterschiede bei der Gravitationsbeschleunigung im Bereich von milliardstel Prozent zu bestimmen.

So genaue Daten stehen mit supraleitenden Gravimetern zur Verfügung. Ein solches ist am Observatorium Wettzell installiert. Im Inneren des mit flüssigem Helium gekühlten Geräts schwebt eine kleine Kugel im Magnetfeld einer Spule. Beide bestehen aus Niob, einem Material, dessen elektrischer Widerstand bei Temperaturen knapp über dem absoluten Nullpunkt auf Grund quantenmechanischer Effekte verschwindet, so dass ihr starkes und hochstabiles Feld über lange Zeit aufrechterhalten werden kann. Kleinste Änderungen der Schwerkraft bewegen die Masse aus ihrer Ruhelage. Eine stabilisierende Spule wird mit einer Regelschleife so gesteuert, dass sie dieser Bewegung entgegenwirkt. Die kleinen Stromänderungen werden dann gemessen.

Fast all diese Schwankungen konnten die Forscher in Wettzell bekannten Ursachen zuordnen. Rätselhaft blieb ein



Die blaue Linie zeigt die simulierten Schwerkraftänderungen im Lauf eines Jahres, berechnet anhand der Messdaten aus aufwändig überwachten ober- und unterirdischen Wasserspeichern. Die orangefarbene Kurve stellt das real gemessene Gravimetersignal dar, bereinigt um bekannte Effekte, etwa die Gezeiten.

Signal, das mit den Jahreszeiten periodisch fluktuierte. Es war nun an uns herauszufinden, ob sich dahinter womöglich veränderliche Wassermengen im Untergrund verbergen und wie sie sich auf die hochgenaue Schweremessung auswirken.

Am einfachsten wäre es gewesen, wenn wir die Daten des Gravimeters mit den wirklichen Wasserbewegungen hätten vergleichen können. Doch wurden diese dort noch nie direkt gemessen. Da das Bohren von Messstellen aufwändig und teuer ist, spielten wir daher verschiedene Szenarien mit Hilfe von Computersimulationen durch. Auf diese Weise wollten wir etwa klären, welche Reaktion auf einen halben Meter Neuschnee zu erwarten wäre. Oder was das Gerät in einem heißen Sommer messen würde, wenn die Bodenfeuchte abnimmt und der Grundwasserspiegel sinkt. Das Ergebnis: Tatsächlich waren die von uns im Modell vorhergesagten Veränderungen der Schwerkraft von ähnlicher Größenordnung wie die bisher unerklärlichen Anteile in den Wettzeller Gravimeterkurven.

Nun war klar, dass wir echte Messdaten benötigten und auf dem Gebiet der Forschungsstation ein dichtes Netz mit Messstellen anlegen mussten. Und so trieben wir bis zu 30 Meter tiefe Bohrungen in den Grundwasserleiter, in denen wir die Pegeländerungen messen konnten, vergruben Hunderte von Bodenfeuchtesensoren und maßen die Regen- und Schneemengen. Wir stanzten sogar einen mehr als drei Tonnen schweren Erdblock aus dem Boden, um ihn wiegen und das Sickerwasser absaugen zu können. Auf diese Weise erfassten wir die Gewichtsschwankungen des Erdreichs infolge von Regenaufnahme, Verdunstung und Grundwasserneubildung.

Eineinhalb Jahre lang sammelten wir Daten. Wir rechneten die Wassermengenänderungen in ein Signal um, wie es das Gravimeter registrieren würde. Dann verglichen wir unsere Messkurven mit denen der Wettzeller Schwerkraftforscher. Die Signale passten zusammen! Mehr noch: Das funktioniert nun auch umgekehrt – wir können mit dem Gravimeter also direkt messen, wie viel Wasser in der Umgebung des Observatoriums hinzukommt oder verloren geht.

Das könnte auch ein weiteres Problem in der Hydrologie lösen. Es ist nämlich schwierig, die Wasserspeicherung in der Landschaft zu messen, da sie von einem Ort zum anderen auch bei kleinen Entfernungen sehr verschieden sein kann. Mit Gravimetern kann hingegen ein großes Volumen über Unterschiede in der Landschaft hinweg und bis in hunderte Meter Tiefe untersucht werden.

Allerdings sind dafür extrem genaue Gravimeter erforderlich. Wir arbeiten mittlerweile mit dem Hersteller der Supraleitgravimeter zusammen, der transportable Geräte entwickelt, deren Präzision für solche Messungen ausreicht. In Tucson, Arizona, überwachen wir mit diesen Gravimetern die Entwicklung eines gigantischen Kanalprojekts, bei dem umgeleitetes Wasser aus dem hunderte Kilometer entfernten Colorado River für eine künstliche Grundwasserneubildung in der wachsenden Wüstenstadt sorgen soll.

So können Hydrologen in Zukunft leichter überwachen, wie die Wasservorräte im Untergrund auf menschliche Nutzung und Klimaveränderungen reagieren, dieses Wissen in Computermodelle einfließen lassen und so die zukünftige Entwicklung gerade für Regionen vorhersagen, wo diese wichtige Ressource nicht so reichhaltig zur Verfügung steht wie in unseren Breiten.

b.creutzfeldt@gfz-potsdam.de

KAROLINE WOLF (M)

> geb. 1978 in Überlingen

> studierte Geoökologie in Potsdam

> promovierte an der Universität Potsdam

> mit dem Thema »Der Effekt von Wasserspeicherung auf zeitliche Schwerkraftmessungen und der Nutzen für die Hydrologie«

> Meine Stationen:

1. Meine Faszination für das Wasser begann in früher Kindheit am Bodensee, den ich in unserer Jolle, auf Schlittschuhen, mit der Sauerstoffflasche und beim Langstreckenschwimmen erforschte.

2. In der Großstadt lernte ich, dass Chaos auch System haben kann – unabdingbare Voraussetzung für das Verständnis komplexer Zusammenhänge.

3. Wettzell im Bayerischen Wald, wo ich meine Feldversuche durchführte, war ein Ruhepol und eine willkommene Abwechslung zum Wissenschaftsbetrieb und Großstadtleben.

> Wenn ich nicht gerade forsche …

… bin ich Vollblutpapa meiner zwei Kinder, spiele Volleyball und erkunde ferne Länder.

> In fünf Jahren …

… werden die meisten Veränderungen hoffentlich weiter so unverhofft kommen wie bisher in meinem Leben.

Susan Schamfuß

»Alles einsteigen, bitte!« – Das U-Bahn-Netz der Pilze

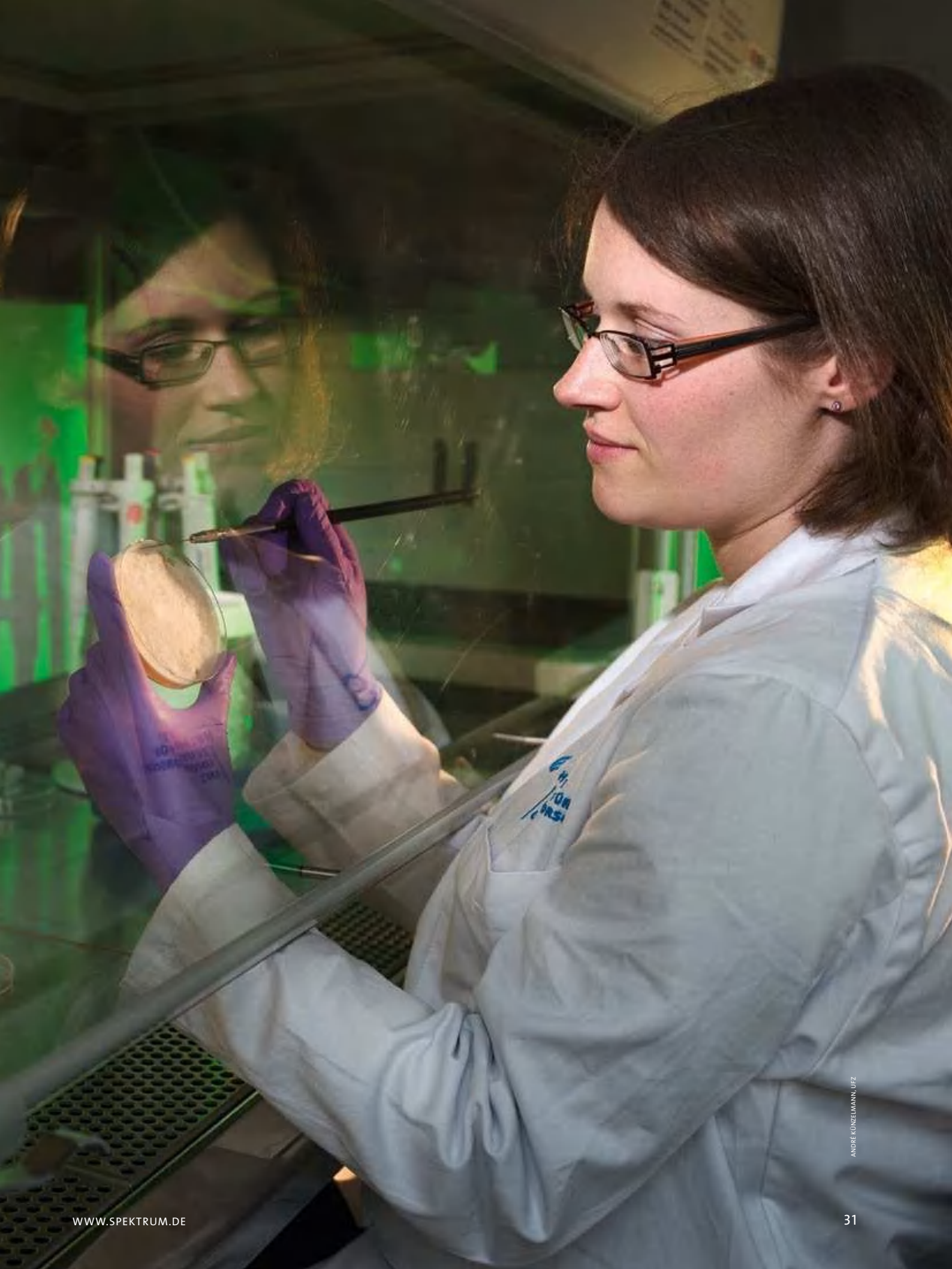
Viele Böden sind mit organischen Schadstoffen belastet, die nur langsam abgebaut werden. Dabei könnte das viel schneller gehen – mit Hilfe weit verzweigter Zellgeflechte. Sie bringen die giftigen Moleküle dorthin, wo Bakterien sie zersetzen können.

Nüchtern betrachtet handelt es sich lediglich um eine Mischung aus mineralischer Materie, organischen Stoffen, Wasser und Luft. Der Boden ist jedoch viel mehr: Lebensraum für unzählige Pflanzen und Tiere und nicht zuletzt Existenzgrundlage für uns Menschen.

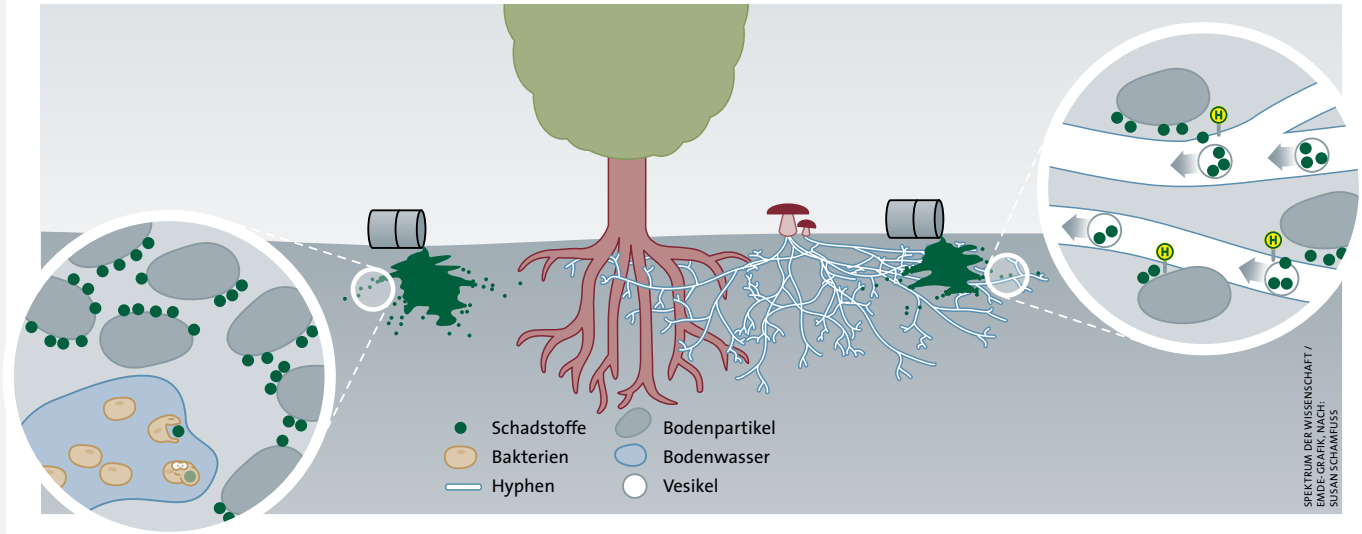
Trotz seiner enormen Bedeutung sind viele Prozesse, die im Erdreich ablaufen, noch immer rätselhaft. Das komplexe Ökosystem Untergrund ist zudem sehr empfindlich. Ungeachtet dessen schädigt der Mensch es mit gefährlichen Substanzen. Dünger und Mittel zur Schädlingsbekämpfung beeinträchtigen die Bodenqualität ebenso wie Schadstoffe, die mit Abgasen aus der Luft eingetragen werden. Der »Spiegel« benannte das Problem bereits in den 1980er Jahren: »Eine übersehene Katastrophe«.

Die Wahrnehmung des Ökosystems Boden befindet sich jedoch mehr und mehr im Wandel. Die Verantwortlichen in Politik und Wirtschaft erkennen heute, wie wichtig es ist, unsere Kenntnisse über Bodenprozesse zu erweitern und wirksame Verfahren für die Sanierung von belastetem Erdreich zu entwickeln.

An der Sterilbank hält Susan Schamfuß eine Kultur von *Pythium ultimum* in den Händen. Dieser Pseudopilz dient in vielen Versuchen als Modellorganismus. Nach einigen Tagen auf einem Nährboden sieht er fast watteähnlich aus. Mit einer Impfnadel entnimmt die Biochemikerin einige Zellfäden, um damit eine frische Kultur anzuzüchten.



ANDRÉ KÜNZELMANN, UFZ



Hydrophobe Schadstoffe lagern sich vor allem an Bodenpartikel an und lösen sich kaum in wassergefüllten Porenräumen, wo Bakterien sie abbauen könnten (links). Fetthaltige Vesikel in Pilzhyphen (rechts) nehmen die Moleküle auf und befördern sie durch luftgefüllte Bereiche hindurch bis zu den Mikroben.

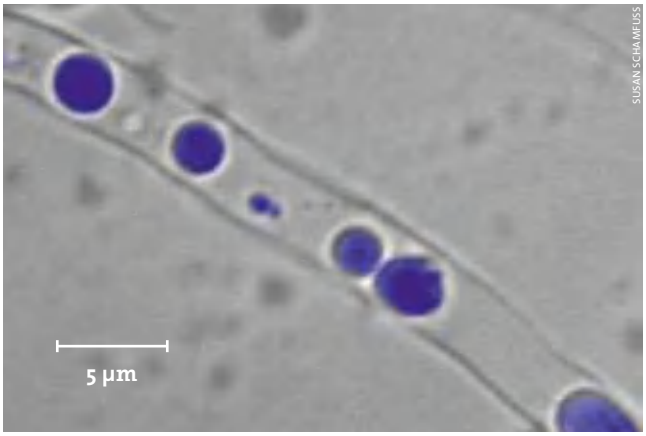
Besonders die Beseitigung hydrophober, also schwer wasserlöslicher organischer Schadstoffe steht dabei im Fokus – diese Stoffe entstehen bei Verbrennungsprozessen, etwa im Automotor. Auch in Erdölprodukten sind sie enthalten und kommen fast überall vor, besonders im Bereich von viel befahrenen Straßen, Tankstellen und Industriegebieten. Sie sind überaus langlebig und reichern sich deshalb im Untergrund an. Viele Böden leiden noch heute unter den Umweltsünden, die vor vielen Jahrzehnten begangen wurden.

Bemerkenswerterweise wohnt dem Erdreich selbst das größte Potenzial zur Beseitigung solcher organischen Schadstoffe inne. Sie sind Nahrung für Myriaden von dort lebenden Bakterien. Ihre Gesamtmasse innerhalb der oberen 30 Zentimeter eines ein Hektar großen Ackers beträgt etwa eine Tonne! Das klingt zunächst viel versprechend, doch gibt es im Hinblick auf die selbstreinigenden Kräfte ein entscheidendes Problem: die Heterogenität des Bodens. Er besteht aus unzähligen größeren und kleineren Partikeln mit wasser- und auch luftgefüllten Poren dazwischen.

Die schadstoffabbauenden Bakterien halten sich in den wassergefüllten Hohlräumen auf, da sie Wasser zum Leben und zur Fortbewegung benötigen. Die hydrophoben Moleküle hingegen kommen kaum im Wasser gelöst vor und lagern sich vorzugsweise an die Bodenpartikel an (siehe Grafik oben). Kurzum: Die Bakterien erreichen die Schadstoffe – ihre Nahrung – nicht, weil die Luftbarriere für sie unüberwindlich ist. Dieses Problem beschäftigt heute viele Bodenwissenschaftler. Pilze könnten sich dabei als nützliche Helfershelfer entpuppen.

Was viele nicht wissen: Pilze machen etwa ein Drittel der gesamten Biomasse im Boden aus. Dabei sind ihre auffälligen Fruchtkörper nur die sprichwörtliche Spitze des Eisbergs, denn der weitaus größere Teil versteckt sich unter der Erde. Dort bilden Pilze ein riesiges, wurzelähnliches Geflecht aus feinen, fadenförmigen Zellen, das Myzel. Dieses besteht aus so genannten Hyphen, die etwa 100-mal dünner sind als Wurzeln und zehnmal dünner als ein menschliches Haar. Das Zellgeflecht eines Pilzorganismus kann sich über viele Quadratkilometer erstrecken. Jeden Kubikzentimeter Boden durchziehen hunderte Meter der feinen Pilzhyphen. Im Malheur National Forest in Oregon gedeiht seit rund 2400 Jahren ein Hallimasch, der sich mittlerweile über fast zehn Quadratkilometer ausgebreitet hat. Er gilt als das größte Lebewesen der Erde.

Der pilzähnliche Organismus *Pythium ultimum* ist im Boden weit verbreitet. Die Mikroskopaufnahme zeigt, dass sich in Vesikeln im Inneren der Zellen ein blau leuchtender organischer Schadstoff löst. Durch das weitläufige Hyphennetzwerk wird er im Untergrund verteilt und steht Bakterien als Nahrung zur Verfügung.



Im Gegensatz zu Bakterien sind Pilze nicht auf durchgängige wassergefüllte Bereiche angewiesen, um sich auszubreiten und nach Nahrung zu suchen. Sie durchwachsen auch luftgefüllte Bodenräume und dringen in Bereiche vor, die Bakterien verwehrt bleiben.

Die über das Myzel aufgenommenen Nährstoffe müssen innerhalb des riesigen Zellnetzwerks verteilt werden, um den gesamten Organismus zu versorgen. Dafür haben Pilze ein ausgeklügeltes System entwickelt. Innerhalb der Hyphen erhalten sie eine Strömung aufrecht, mit der Nährstoffe, Signalmoleküle und verschiedene Zellbestandteile hin- und herbefördert werden.

Meine Kollegen und ich konnten zeigen, dass die Pilznetzwerke nicht nur Nährstoffe, sondern auch andere organische Stoffe transportieren. So wiesen wir nach, dass sich die eingangs erwähnten hydrophoben Schadstoffe in fetthaltigen Bläschen, so genannten Vesikeln, im Inneren des Pilzes ansammeln und zusammen mit der Zellflüssigkeit durch die Hyphen strömen.

Diese Vesikel könnte man mit Mini-U-Bahnen vergleichen, die sich innerhalb ihrer Tunnel, den Hyphen, bewegen und Schadstoffe als Fahrgäste transportieren. Die Vesikel kommen dabei auf Geschwindigkeiten von einigen Zentimetern pro Stunde. Das erscheint nicht besonders schnell, doch entspricht diese Distanz dem 10 000-Fachen einer Vesikellänge – übertragen auf die Größe einer echten U-Bahn entspräche das einer Geschwindigkeit von einigen hundert Kilometern pro Stunde!

Die Haltestellen liegen natürlich nicht an festgelegten Orten, sondern entstehen spontan immer dort, wo Schadstoffe die Zellwände durchdringen und in jenen fettreichen Vesikeln gebunden werden. Diese Bläschen wandern durch das Netzwerk. Die organischen Moleküle gelangen dann vor allem an solchen Stellen wieder nach außen, wo die Schadstoffkonzentration gering ist. Dort verwerten Bakterien in der Umgebung sie als Nahrung und bauen sie auf diese Weise ab.

Wir zeigten zudem, dass die Menge an beförderten Schadstoffen direkt mit der Anzahl möglicher Haltestellen zusammenhängt. Das bedeutet, dass der Pilz dieselbe Menge an Schadstoffen langsamer transportiert, wenn ein Zustieg nur in einem kleinen Bereich erfolgen kann. Dies lässt sich mit dem U-Bahn-System vergleichen: Wenn alle Fahrgäste versuchen, an einer Haltestelle einzusteigen, kommt es schnell zum Stau. Verteilen sie sich auf viele Haltestellen, können problemlos alle mitfahren.

Diese bisher unbekannten Prozesse wiesen wir zunächst im Labor nach, wo wir das Zusammenwirken eines pilzähnlichen Organismus mit einem Bakterium beobachteten. Nun wollen wir die Mechanismen auch im natürlichen Boden testen. Hier leben viele verschiedene Pilz- und Bakterienarten nebeneinander. Nicht alle kommen so gut miteinander aus wie unsere Testkulturen; daher wird es vor allem darauf ankommen, für die gezielte Beseitigung von wasserunlöslichen Verunreinigungen die richtigen Partner zu finden.

Am Ende können wir vielleicht Methoden entwickeln, mit denen sich Böden sanieren lassen, ohne dass das Erdreich abgetragen oder mechanisch bearbeitet werden muss. Es würde genügen, je nach Art der Schadstoffe einen maßgeschneiderten Cocktail aus Pilzen und Bakterien in den Boden einzubringen. Besonders optimistisch sind wir diesbezüglich in Gebieten mit vergleichsweise niedriger Kontamination: Die winzigen Organismen könnten unsichtbar die Böden aufbereiten – noch bevor sich die Schadstoffe in bedenklichem Maß anreichern.

ANDRÉ KÜNZELMANN, UFZ (M)

Susan Schamfuß
susan.foss@ufz.de

> geb. 1985 in Zwenkau

> studierte Biochemie in Leipzig

> promoviert am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) in Leipzig

> mit dem Thema »Der Einfluss von Pilznetzwerken auf die Bioverfügbarkeit und den Abbau erdölbasierter Schadstoffe in Böden«

> Meine Stationen:

Ein Chemieleistungskurs begeisterte mich für Naturwissenschaften. Im Studium merkte ich aber, dass ich nicht zur »Forscherin um der Forschung willen« geboren war. Praktika und Vorlesungen brachten mich dem UFZ nahe. Dessen Motto »Forschen für die Umwelt« ist genau das, was mich in meiner Arbeit antreibt.

> Wenn ich nicht gerade forsche …

… verbringe ich meine Zeit mit Geigespielen, Chorsingen, Joga und Freunden. Und bald auch mit dem Wechseln von Windeln.

> In fünf Jahren …

… lebe ich hoffentlich mit zwei Kindern und meinem Mann in einer etwas größeren Wohnung.

Der »Küchenzuruf« …

… ist ein Muss für jeden Text. Der Begriff wurde geprägt vom ehemaligen Chefredakteur des »Stern« Henri Nannen. In seiner Beschreibung aus den 1970er Jahren ist es allerdings Hans, der es sich nach dem Einkaufen mit der neuen Ausgabe des Magazins im Esszimmer gemütlich macht, während »Grete sich in die Küche verfügt«. Nach der Lektüre eines Artikels ruft Hans seiner Frau voller Empörung durch die geöffnete Küchentür zu: »›Mensch, Grete, die in Bonn spinnen komplett! Die wollen schon wieder die Steuern erhöhen!‹ Diese beiden knappen Sätze sind der so genannte Küchenzuruf des journalistischen Textes.«

Spektrum CUSTOM PUBLISHING

Leitung: Dr. Joachim Schüring
Anschrift: Spektrum der Wissenschaft – Custom Publishing, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-612, Fax 06221 9126-5612;

www.spektrum.com/cp

Redaktion: Mike Beckers, Lars Fischer
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Claus Schäfer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Redaktionsassistenz: Inga Merk
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck

Erscheinungstermin: Spektrum der Wissenschaft 12/2012

HELMHOLTZ ZENTRUM FÜR UMWELTFORSCHUNG UFZ

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit: Doris Böhme, Susanne Hufe, Bettina Hennebach
Anschrift: Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Permoserstraße 15, 04318 Leipzig

www.ufz.de/wissenschaft-verstehen

Gesamtherstellung: L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2012 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt.

Forschen für die Umwelt

www.ufz.de

Als internationales Kompetenzzentrum für Umweltwissenschaften untersucht das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ die komplexen Wechselwirkungen zwischen Mensch und Natur unter dem Einfluss des globalen Wandels. In enger Kooperation mit Entscheidungsträgern und Stakeholdern der Gesellschaft erarbeiten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des UFZ Systemlösungen, um komplexe Umweltsysteme besser zu managen und Umweltprobleme zu überwinden. So geht es etwa um das Management von Wasserressourcen, die Folgen des Landnutzungswandels für die biologische Vielfalt, die Wirkung von Chemikalien auf die Umwelt und die Gesundheit des Menschen sowie Anpassungsstrategien an den Klimawandel.

Unsere Kernthemen

1. Landnutzung / Biodiversität / Bioenergie
2. Wasser / Boden
3. Chemikalien in der Umwelt / Gesundheit

Unsere Querschnittsthemen

1. Sozialwissenschaften
2. Monitoring / Observatorien
3. Modellierung / Visualisierung

HELMHOLTZ
ZENTRUM FÜR
UMWELTFORSCHUNG
UFZ

Spektrum DER WISSENSCHAFT DIE WOCHE

Deutschlands erstes wöchentliches Wissenschaftsmagazin

Jetzt jeden Donnerstag

- mit mehr als 30 Seiten Hintergründen, News, Kommentaren und Bildern aus der Forschung
- im Abo nur 0,77 € pro Ausgabe
- jederzeit kündbar

Infos und Bestellmöglichkeit:

www.spektrum.de/testwoche